

مطالعه کانی‌شناسی، ژئوشیمی، میانبارهای سیال و ژئز کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان، جنوب باختر بهاباد، استان یزد

رئوف امیرخانی^۱، محمد ابراهیمی^{۲*}، میرعلی‌اصغر مختاری^۲ و امیر مرتضی‌عظیم‌زاده^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

چکیده

منطقه مورد مطالعه که در این نوشتار با عنوان کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان معرفی شده، بخشی از بلوک پشت بادام در پهنه ایران مرکزی است و در فاصله حدود ۱۲ کیلومتری جنوب باختر شهر بهاباد جای دارد. رخنمون‌های سنگی این منطقه عبارت از واحدهای آتشفشانی-رسوبی و توده‌های نفوذی اسیدی تا بازیک به سن پراکامبرین و کامبرین هستند. کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت به صورت عدسی‌هایی در مجاورت جنوب باختری روستای همیجان و درون سنگ میزبان توفی حدواسط-اسیدی و دولومیت‌ها رخنمون یافته است. مگنتیت، اولیویست (هماتیت)، پیریت و کالکوپریت کانه‌های اصلی تشکیل دهنده کانه‌زایی آهن منطقه همیجان و آپاتیت، پیروکسن، ترمولیت-اکتینولیت، کلسیت و کوارتز کانی‌های اصلی مواد باطله در این کانه‌زایی هستند. مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان از این دارد که ساخت و بافت‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان شامل توده‌ای، برشی، رگه-رگچه‌ای و جانشینی است. نتایج تجزیه نمونه‌ها بیانگر این است که این کانه‌زایی دارای تمرکز بالایی از عناصر خاکی کمیاب است و عیار مجموع عناصر خاکی کمیاب (ΣREE) در بلورهای آپاتیت به ۲/۵ درصد می‌رسد. مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که Fet دارای همبستگی منفی قوی با P_2O_5 ، ΣREE و P_2O_5 ، SiO₂ دارای همبستگی مثبت قوی با ΣREE است. تجزیه کیفی و بررسی طیف‌های تهیه شده به روش SEM-EDS نمونه‌های آپاتیت‌دار نشانگر وجود ۲ نوع کانی عناصر خاکی کمیاب موناژیت و آلانیت به صورت ادخال در داخل آپاتیت است. همچنین، این مطالعات ماهیت فلوتوردار بودن آپاتیت‌ها را تأیید می‌کند. مطالعه میانبارهای سیال در بلورهای آپاتیت بیانگر شوری بیشتر سیال‌ها در محدوده ۷/۸۶ تا ۱۳/۹ درصد وزنی NaCl و بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی مربوط به محدوده دمایی ۲۴۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد است. مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان با دیگر کانسارهای اکسیدی آهن-آپاتیت بلوک پشت بادام و کانسارهای آهن تپ کایرونا، همانندی میان این الگوها را نشان می‌دهد. به طور کلی، با توجه به شواهد مطالعات صحرایی و ژئوشیمیایی می‌توان کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان را در گروه کانسارهای آهن نوع کایرونا رده‌بندی کرد.

کلیدواژه‌ها: کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت، همیجان، بهاباد، بلوک پشت بادام، ایران مرکزی.

*نویسنده مسئول: محمد ابراهیمی

E-mail: ebrahimi@znu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

بلوک پشت بادام یک پهنه فلززایی (متالورژنی) است که کانی‌سازی‌های ارزشمندی از عناصر مختلف مانند آهن (مانند چغارت، چادرملو، سه‌چاهون، لکه‌سیاه و ...)، فسفات (اسفوردی، زریگان و گزستان)، سرب و روی (کوشک، چاه‌میر و زریگان)، اورانیم (ساختند) و عناصر خاکی کمیاب (کانسارهای فسفات و آهن-فسفات) در این پهنه تشکیل شده است و امروزه به عنوان یکی از شاخص‌ترین مناطق معدنی ایران شناخته می‌شود. مطالعات بسیاری در رابطه با کانسارهای یاد شده و زمین‌شناسی منطقه توسط پژوهشگران مختلف (درویش‌زاده، ۱۳۶۲؛ عابدیان، ۱۳۶۲؛ سهیلی و مهدوی، ۱۳۷۰؛ درویش‌زاده و آل‌طه، ۱۳۷۵؛ موسوی ماکوئی، ۱۳۷۷؛ سامانی، ۱۳۶۴، ۱۳۷۱، ۱۳۷۷ و رحمانی و مختاری، ۱۳۸۱؛ مختاری و همکاران، ۱۳۸۲؛ صادقی دعوتی و همکاران، ۱۳۸۶؛ گل‌کرم و همکاران، ۱۳۸۹؛ بلاغی و همکاران، ۱۳۸۹؛ محمدتراب، ۱۳۸۹؛ بومری، ۱۳۹۱؛ مختاری و خضری، ۱۳۹۲؛ نبوی شقافی، ۱۳۹۳؛ بیات، ۱۳۹۳؛ محمدی، ۱۳۹۳؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ رحیمی، ۱۳۹۴؛ Haghpoor, 1974؛ Daliran, 1990؛ Förster and Jafarzadeh, 1994؛ Ramazani and Tucker, 2003؛ Jami, 2005؛ Mokhtari and Emami, 2008؛ Bonyadi et al., 2011؛ Mokhtari et al., 2013؛ Mokhtari and Ebrahimi, 2015) انجام شده است. در منطقه همیجان که بخشی از بلوک پشت بادام است، رخنمون‌هایی از کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت در مجاورت توده گرانیتی همیجان وجود دارد که در سال‌های گذشته در قالب مطالعات اکتشافی و پایان‌نامه‌های دانشگاهی مورد بررسی مقدماتی قرار گرفته‌اند (مختاری و خضری، ۱۳۹۲؛ محمدی، ۱۳۹۳)؛ ولی ویژگی‌های دقیق کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبارهای سیال کانه‌زایی اشاره شده مورد مطالعه قرار نگرفته است. از سوی دیگر، این کانه‌زایی دارای تمرکزهای بالایی از عناصر خاکی کمیاب است (مختاری و خضری، ۱۳۹۲؛ محمدی، ۱۳۹۳؛

Mokhtari and Ebrahimi, 2015)، ولی نوع کانی‌های مربوط به این عناصر در مطالعات یاد شده مشخص نشده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر تلاش می‌شود تا ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان همراه با داده‌های میانبارهای سیال و تجزیه‌های میکروسکوپی الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش مطالعه

این پژوهش با انجام بازبیدهای صحرایی طی نوبت‌های متوالی و متناسب با کانه‌زایی، شروع و در طی آن ویژگی‌ها و پدیده‌های زمین‌شناسی مرتبط با موضوع مورد پژوهش ثبت شد. همچنین، از بخش‌های مختلف کانه‌زایی، به منظور مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌برداری و از نمونه‌های برداشت شده، ۱۰ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک-صیقلی تهیه و از آنها برای مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری استفاده شد. پس از مطالعات میکروسکوپی، ۳ نمونه مناسب برای مطالعه میانبارهای سیال انتخاب و در آزمایشگاه میانبارهای سیال سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهش‌های میکروسکوپی برای مطالعه میانبارهای سیال از میکروسکوپ Nikon مدل Ep200 استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های دمافاشارسنجی به وسیله استیج گرم و سردکننده مدل MDS600 ساخت شرکت Linkam با تغییرات دمایی میان ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد و سامانه نمایش همزمان متصل به کامپیوتر با قابلیت تهیه فیلم و اسلاید انجام شده است. به منظور مطالعات ژئوشیمیایی، ۲۲ نمونه برداشت شده از بخش‌های مختلف کانسنگ مگنتیت-آپاتیت، به روش‌های XRF و ICP-MS در آزمایشگاه زرآزمای تجزیه شد (جدول ۱). به منظور شناسایی کانی‌های حامل عناصر خاکی کمیاب نیز ۳ نمونه برای انجام تجزیه‌های کیفی و

۴-۱. عدسی شماره ۱

عدسی شماره ۱ که در حقیقت بزرگ‌ترین رخنمون کانه‌زایی آهن در منطقه همیجان است، در طول بیش از ۳۰۰ متر و ستبرای متغیر میان ۱ تا ۳۰ متر، با ستبرای میانگین حدود ۲۰ متر رخنمون دارد (شکل‌های ۳ و ۴). این عدسی با راستای شمال و شمال باختر- جنوب و جنوب خاور و شیب حدود ۵۰ درجه به سوی باختر، در دامنه خاوری کوه سیاه رخنمون یافته است. این عدسی متشکل از مگنتیت است که در بخش‌های حاشیه‌ای، به ویژه بخش قاعده‌ای، کانه‌زایی فسفات نیز آن را همراهی می‌کند. در برخی نقاط، تجمع فسفات به حدی است که می‌توان یک بخش فسفات به ستبرای بیشینه ۱ متر را مجزا کرد. این عدسی توسط واحدهای توفی با ترکیب حدواسط میزبانی می‌شود و به سوی بالا، به گنبد ریولیتی کوه سیاه می‌رسد (شکل ۴).

۴-۲. عدسی شماره ۲

عدسی شماره ۲ به طول حدود ۵۰ متر و پهنای میانگین حدود ۱۰ متر در فاصله حدود ۳۰۰ متری خاور عدسی شماره ۱ رخنمون دارد (شکل ۳). این عدسی با راستای تقریبی خاوری- باختری و شیب حدود ۷۵ درجه به سوی جنوب، روی واحد دولومیتی و در زیر ماسه‌سنگ‌های آرکوزی تیره رنگ جای گرفته است. ترکیب کانی‌شناسی این عدسی نیز مگنتیتی است که در بخش‌های خاوری و به ویژه در بخش قاعده‌ای آن، یک بخش فسفات دیده می‌شود (شکل ۵). ستبرای بخش فسفات یاد شده در بخش‌هایی تا ۳ متر نیز می‌رسد. در این بخش، بلورهای خودشکل آپاتیت در زمینه‌ای از مگنتیت پراکنده هستند (شکل ۵) و طول بلورهای آپاتیت گاه به ۵ سانتی‌متر می‌رسد. در انتهای خاوری عدسی، بلورهای رشته‌ای اکتینولیت نیز در همراهی با آپاتیت حضور دارند (شکل ۶-الف). در برخی نقاط، تجمع اکتینولیت به حدی است که مجموعه اکتینولیت- آپاتیت- مگنتیت را می‌توان با عنوان سنگ سبز مگنتیت‌دار نام‌گذاری کرد. افزون بر موارد یادشده، ساختار برشی در نتیجه تشکیل کانه‌زایی مگنتیت درون واحد دولومیتی موجود در کمر پایین عدسی مگنتیت- آپاتیت تشکیل شده است (شکل ۶-ب). ستبرای این بخش برشی به ۰/۵ متر می‌رسد.

۴-۳. عدسی شماره ۳

عدسی شماره ۳ با طول حدود ۳۰ متر و ستبرای بیشینه ۲/۵ متر در حد فاصل عدسی شماره ۱ و ۲ رخنمون یافته است. این عدسی با راستای N45E و شیب حدود ۷۰ درجه به سمت جنوب خاور، درون واحد توفی حدواسط- اسیدی رخنمون دارد که به سوی ارتفاعات بالادست، توسط گنبد ریولیتی پوشیده می‌شود (شکل ۷). در این عدسی نیز کانه‌زایی غالب از نوع مگنتیت است که در برخی نقاط، مقادیر بسیار جزئی فسفات درون آن دیده می‌شود.

۵- کانی‌شناسی مواد معدنی و باطله

بر پایه مطالعات کانه‌نگاری، مگنتیت، اولیژست (هماتیت)، پیریت و کالکوپیریت کانه‌های موجود در کانه‌زایی آهن منطقه همیجان هستند. هماتیت، گوتیت و لیمونیت در اثر پدیده‌های هوازدگی و بروز نژاد تشکیل شده‌اند. آپاتیت، پیروکسن، ترمولیت- اکتینولیت، کلسیت و کوآرتز کانی‌های باطله در این کانه‌زایی هستند. مگنتیت کانه اصلی این کانه‌زایی است (شکل ۸-الف) که بیشتر بافت توده‌ای دارد. در نتیجه فرایند مارتیتی شدن، بخش‌هایی از مگنتیت در امتداد شکستگی‌ها به هماتیت تبدیل شده‌اند (شکل ۸-ب). رگه و رگچه‌های بسیاری از کانه‌زایی سیلیسی- سولفیدی، عدسی‌های مگنتیتی را در برخی نقاط قطع کرده است. رگه و رگچه‌های اشاره شده بیشتر از پیریت به همراه مقادیر کمی کالکوپیریت تشکیل شده‌اند. پیریت‌ها به صورت بلورهای خودشکل تا نیمه‌خودشکل و با بافت حفره‌دار هستند (شکل ۸-پ). بلورهای پیریت، دگرسانی به گوتیت را از حاشیه‌ها نشان می‌دهند (شکل ۸-ت). در برخی نقاط، دگرسانی به گوتیت تا حدی پیش رفته است که پیریت به صورت جزایری کوچک درون گوتیت دیده می‌شود و یا کاملاً توسط گوتیت جایگزین شده است. دیگر کانه سولفیدی موجود در رگه و رگچه‌های سولفیدی، کالکوپیریت است که توسط مختاری و خضری (۱۳۹۲) گزارش شده

نیمه کمی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس انتخاب شد. تجزیه‌های یاد شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل EVO MA 10 Scanning Electron Microscope-Zeiss مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) در دانشگاه مونتان لئوبن اتریش (Montan Universität Leoben) انجام شد.

۳- زمین‌شناسی

کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان بخشی از بلوک پشت بادام در پهنه ایران مرکزی است و در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری خاور یزد و ۱۲ کیلومتری جنوب باختر شهر بهاباد جای دارد (شکل ۱). این منطقه در تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (آقاباتی، ۱۳۸۳)، بخشی از پهنه ایران مرکزی و زیرپهنه بلوک پشت‌بادام است. در مقیاس کوچک‌تر، این منطقه در حاشیه خاوری برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی اسفوردی (سهیلی و مهدوی، ۱۳۷۰) جای گرفته است. گوناگونی سنگ‌شناسی و فازهای ماگمایی که در پهنه ایران مرکزی دیده می‌شود، در این ناحیه نیز به خوبی آشکار است. بر پایه نقشه ۱:۲۰۰۰۰ محدوده اکتشافی آهن همیجان (مختاری و خضری، ۱۳۹۲)، بیشتر رخنمون‌های سنگی منطقه به پراکامبرین و کامبرین تعلق دارند. این سنگ‌ها شامل دولومیت، توف‌های ریولیتی و حدواسط، گدازه‌های ریولیتی و گاه گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی، ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ و شیل به همراه توده بزرگ گرانیتوئیدی همیجان، توده کوچک گرانیتوئیدی فردوس، توده‌های کوچک گابرویی- دیوریتی و گنبد ریولیتی کوه سیاه است (شکل ۲). توده گرانیتی همیجان یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین واحدهای سنگی این منطقه بوده و ارتباط فضایی نزدیکی با کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان دارد. مطالعات محمدی و همکاران (۱۳۹۴) نشان می‌دهد که توده گرانیتوئیدی همیجان متشکل از طیف پیوسته‌ای شامل یک توده نفوذی کم‌رزا در بخش‌های مرکزی تا گدازه‌ها و توف‌های ریولیتی در بخش‌های حاشیه‌ای است. توده گرانیتوئیدی همیجان در بخش مرکزی بافت پورفیری و اسفرولیتی تبدیل می‌شود. حتی در حاشیه‌ای‌ترین بخش، توف‌های ریولیتی با ویژگی‌های آذرآواری دیده می‌شوند (محمدی، ۱۳۹۳؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). توده گرانیتوئیدی همیجان به سوی بالا، توسط واحدهای دولومیتی سازند ریزو پوشیده می‌شود. توده‌های گابرویی کوچکی درون توده گرانیتی همیجان دیده می‌شوند که محمدی (۱۳۹۳) این توده‌ها را به عنوان آنکلاوهای بزرگ در نظر گرفته است. در حاشیه توده گرانیتی همیجان و در مجاورت با کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان، یک گنبد آتشفشانی وجود دارد که با رنگ تیره خود، از دور مشخص و به دلیل رنگ تیره خود، به کوه سیاه معروف است. این گنبد ترکیب ریولیتی دارد. این سنگ‌ها بسیار ریزبلور هستند و در نمونه دستی به صورت سنگ‌های غنی از سیلیس بدون حضور کانی مافیک دیده می‌شوند. یکی از مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه عبارت است از تناوب دولومیت‌های متوسط تا ستبر لایه به رنگ قهوه‌ای تا نخودی و توف‌های حدواسط خاکستری رنگ که میزبان کانه‌زایی آهن منطقه همیجان هستند. این واحد به صورت همشیب روی بخش‌های ریولیتی گرانیت همیجان جای گرفته است. گنبد ریولیتی کوه سیاه به درون این واحد نفوذ کرده است.

۴- کانه‌زایی

کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان در جنوب باختری روستای همیجان و در دامنه خاوری و شمال خاوری کوه سیاه واقع شده است (شکل ۲ و ۳). در این منطقه، عدسی‌های کانه‌زایی آهن در ۳ بخش دیده می‌شود. بر پایه موقعیت جایگیری عدسی‌های کانه‌زایی آهن و با توجه به ابعاد رخنمون آنها، این کانه‌زایی‌ها به ترتیب با نام‌های عدسی شماره ۱ (عدسی بزرگ)، عدسی شماره ۲ (عدسی متوسط) و عدسی شماره ۳ (عدسی کوچک) در این پژوهش معرفی شده‌اند. این کانه‌زایی‌ها بیشتر از مگنتیت تشکیل شده‌اند که در برخی نقاط، با مقادیر متغیری آپاتیت همراه هستند.

ساخت و بافت برشی بیشتر در حاشیه عدسی‌های مگنتیتی دیده می‌شود. در نتیجه فشار سیال‌های گرمایی کانه‌ساز یا مذاب اکسید آهن غنی از عناصر ناسازگار مانند P، REEs و فلونور، سنگ‌های میزبان دچار شکستگی شده‌اند و کانه‌زایی مگنتیت درون شکستگی‌های سنگ میزبان با منظره برشی تشکیل شده است (شکل ۶-ب). افزون بر ساخت برشی یاد شده، پس از جایگیری و تبلور عدسی‌های مگنتیتی، تنش‌های زمین‌ساختی موجب شکستگی و خرد شدن آن در برخی نقاط شده است که گاه با جابه‌جایی‌های به نسبت قابل توجهی نیز همراه هستند. آثار تنش‌های زمین‌ساختی به صورت بخش‌های خرد شده در مقاطع میکروسکوپی مشخص است (شکل ۹-ث). در نتیجه این تنش، بلورهای آپاتیت نیز دچار شکستگی‌های بسیار شده‌اند (شکل ۹-ب). بافت رگه-رگچه‌ای از دیگر بافت‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان است. این بافت بیشتر در ارتباط با رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی، کوارتز-اولیژیستی و کوارتزی و کربناتی تأخیری است که مراحل ابتدایی کانه‌زایی و عدسی‌های مگنتیت-آپاتیت با بافت توده‌ای را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۹-الف و ث). بافت جانیشنی از دیگر بافت‌های دیده شده در این منطقه است. در نتیجه دگرسانی برنوزاد، کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپریت توسط هیدروکسیدهای آهن (گوتیت و لیمونیت) جانشین شده‌اند که در برخی نمونه‌ها، بقایای پیریت و کالکوپریت را می‌توان به صورت جزایری درون گوتیت دید (شکل‌های ۸-پ و ت). همچنین، در نتیجه فرایند مارتیتی شدن مگنتیت، جایگزینی این کانی توسط هماتیت صورت گرفته است (شکل‌های ۸-الف و ب).

۷- مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنزی

بر پایه مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، مراحل کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به ۴ مرحله به شرح زیر تقسیم کرد: در مرحله اول کانه‌زایی، مذاب اکسید آهنی-فسفاتی (یا احتمالاً سیال‌های ماگمایی غنی از آهن و فسفات) سبب تشکیل کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت در توف‌های حدواسط-اسیدی و دولومیت‌ها شده است. کانی‌زایی آهن در این مرحله با تشکیل عدسی‌های مگنتیت-آپاتیت با بافت توده‌ای همراه است. مرحله دوم کانه‌زایی را یک سری رگه و رگچه‌های کوارتز-سولفیدی (پیریت ± کالکوپریت) تشکیل می‌دهند که عدسی‌های مگنتیت-آپاتیت را قطع کرده‌اند. در مرحله بعد، یک سری رگه و رگچه‌های کوارتز-اولیژیست به درون منطقه تزریق شده است که کانی‌سازی‌های مگنتیت-آپاتیت و واحدهای سنگ میزبان آنها را قطع کرده است. شواهدی از ارتباط صحرایی و میکروسکوپی میان رگه-رگچه‌های کوارتز-اولیژیستی و رگه-رگچه‌های کوارتز-سولفیدی دیده نشد. ولی با توجه به گسترش به نسبت زیاد رگه-رگچه‌های کوارتز-اولیژیستی در بخش‌های مختلف منطقه و حتی دور از کانه‌زایی‌های مگنتیت-آپاتیت، به نظر می‌رسد این رگه-رگچه‌ها تأخیری تر از رگه-رگچه‌های سولفیدی باشند. همچنین، رگچه‌های کوارتزی و کربناتی تأخیری بدون کانه‌زایی در بخش‌های انتهایی این مرحله تشکیل شده‌اند. در مرحله چهارم، تأثیر فرایندهای هوازدگی و برنوزاد سبب دگرسانی کانی‌های مرحله اکسیدی و سولفیدی شده است، به گونه‌ای که طی فرایند اکسایش، کانی‌های هماتیت، گوتیت و لیمونیت از دگرسانی مگنتیت، پیریت و کالکوپریت به وجود آمده‌اند. با توجه به مطالعات صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، توالی پاراژنزی و مراحل کانه‌زایی در منطقه همیجان را می‌توان به صورت جدول ۲ خلاصه کرد.

۸- ژئوشیمی

نتایج تجزیه ۲۲ نمونه برداشت شده از بخش‌های مختلف کانه‌زایی به دو روش XRF و ICP-MS (جدول ۱) نشان می‌دهد که محتوای Fe در نمونه‌های مگنتیتی میان ۵۳ تا ۶۳/۵ درصد است. این در حالی است که عیار P_2O_5 در این نمونه‌ها به ۲ تا ۶/۲۵ درصد می‌رسد. نمونه‌های مگنتیت-آپاتیت، دارای Fe حدوداً ۳۲/۲ تا ۴۶/۵ و عیار P_2O_5 میان ۳/۸۴ تا ۱۵ درصد هستند. نمونه برداشته شده از بخش فسفاتی نیز

است؛ ولی در مطالعات حاضر، کالکوپریت شناسایی نشد. بیشتر کالکوپریت‌ها دچار دگرسانی و توسط گوتیت جایگزین شده‌اند. درجه دگرسانی به گوتیت متغیر است؛ در برخی نقاط بقایای کالکوپریت به صورت جزایری درون گوتیت‌ها دیده می‌شود (مختاری و خضری، ۱۳۹۲). اولیژیست در قالب رگه و رگچه‌های کوارتز-اولیژیست در صحرا و نمونه دستی دیده می‌شود که واحدهای سنگ میزبان (توف، ماسه‌سنگ، ریولیت و دولومیت) و کانه‌زایی‌های مگنتیتی را قطع کرده است. ستبرای این رگه و رگچه‌ها به طور معمول از چند میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر متغیر است. با توجه به مطالعات میکروسکوپی، اولیژیست‌ها به صورت بلورهای ورقه‌ای شکل در متن رگه و رگچه‌های کوارتز-اولیژیست دیده می‌شود (شکل ۸-ج). هماتیت در نتیجه فرایند مارتیتی شدن، از دگرسانی مگنتیت تشکیل شده است (شکل ۸-ب). گوتیت، محصول دگرسانی مگنتیت و کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپریت) است (شکل‌های ۸-ت و ج).

آپاتیت شاخص‌ترین کانی باطله در کانه‌زایی‌های آهن منطقه همیجان است. در نمونه دستی، بلورهای خودشکل آپاتیت در میان کانه‌های مگنتیت به صورت پراکنده دیده می‌شوند. در زیر میکروسکوپ، بلورهای خودشکل آپاتیت به صورت بلورهای کوچک و میلی‌متری در فضای میان مگنتیت‌ها تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۹-الف و ب). در برخی نمونه‌ها، بلورهای خودشکل و ریز آپاتیت در امتداد شکستگی‌های میان کانسنگ مگنتیتی دیده می‌شوند. فراوان‌ترین کانی سیلیکاتی آب‌دار همراه مگنتیت در کانه‌زایی آهن منطقه همیجان، آمفیبول‌های سری ترمولیت-اکتینولیت هستند. این کانی‌ها به صورت تجمعات شعاعی و اشکال سوزنی شکل تشکیل شده‌اند. بر پایه شواهد صحرایی، اکتینولیت به صورت بلورهای رشته‌ای و سوزنی در حاشیه شکستگی‌ها و به ویژه در کمر پایین عدسی شماره ۲ منطقه کوه سیاه (همیجان) تشکیل شده‌اند (شکل ۶-الف). در زیر میکروسکوپ، این کانی به صورت بلورهای رشته‌ای مشخص است (شکل ۹-پ). شواهد میکروسکوپی نشان می‌دهد که اکتینولیت محصول دگرسانی پسروده کلینوپیروکسن است و می‌توان جزایری از پیروکسن درون اکتینولیت‌ها شناسایی کرد (شکل ۹-پ). رگه و رگچه‌های کلسیتی و گاه آتکریتی تأخیری در برخی نقاط، عدسی‌های مگنتیتی را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۹-ت و ث). این فرایند سبب به تشکیل بافت برشی نیز انجامیده است. همچنین، در نتیجه دگرسانی پیروکسن، کلسیت نیز در همراهی با ترمولیت-اکتینولیت تشکیل شده است (شکل ۹-ج). همچنان که پیشتر گفته شد، رگه و رگچه‌های کوارتز-اولیژیست و همچنین رگه و رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی در برخی نقاط کانه‌زایی مگنتیتی را قطع کرده‌اند (شکل ۹-ث). کوارتز به عنوان کانی باطله اصلی این رگه و رگچه‌ها را همراهی می‌کند. همچنین، رگچه‌های کوارتزی تأخیری بدون همراهی کانی‌سازی سولفیدی و اولیژیست، واحدهای کهن تر را قطع کرده‌اند.

۹- ساخت و بافت کانه‌زایی

مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان می‌دهند که ساخت و بافت‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان شامل توده‌ای، برشی، رگه-رگچه‌ای و جانیشنی هستند. شاخص‌ترین و مهم‌ترین ساخت و بافت کانه‌زایی در این منطقه بافت توده‌ای است. این بافت بیشتر عدسی‌های مگنتیت-آپاتیت را در منطقه مورد مطالعه دربر می‌گیرد. مگنتیت کانه اصلی موجود در این بافت است و آپاتیت به صورت بلورهای خودشکل ریز و درشت در مقادیر متغیر در همراهی با آن دیده می‌شود (شکل‌های ۹-الف و ب). در بخش‌های حاشیه‌ای عدسی‌های مگنتیت، بلورهای خودشکل آپاتیت در متنی از مگنتیت قرار گرفته‌اند (شکل ۵). این بخش‌ها نشانگر ترتیب تبلور آپاتیت و مگنتیت است؛ به این مفهوم که ابتدا بلورهای آپاتیت خودشکل تبلور شده‌اند و سپس مگنتیت فضای بین آنها را پر کرده است. تمرکز بلورهای آپاتیت در بخش‌های حاشیه‌ای عدسی‌ها و رگه‌های مگنتیت منطقه مورد مطالعه نیز بیانگر تفریق و منطقه‌بندی کانه‌زایی است.

۹- کانی‌های عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی همیجان

مطالعات پیشین در مورد کانی‌های حامل عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی‌های مگنتیت- آپاتیت ایران مرکزی (مانند محمدتراب، ۱۳۸۹؛ بومری، ۱۳۹۱؛ Jami, 2005; Kryvdik and Mykhaylov, 2001) کانی‌هایی مانند مونازیت، گزنوتیم، باستانزیت، اورتیت، توریت، بریتولیت، آلانیت و پاریزیت- سینتزیت را در همراهی با آپاتیت در این کانسارها و به‌ویژه کانسار مگنتیت- آپاتیت اسفوردی نشان داده است. بر این اساس، به منظور شناسایی کانی‌های حامل عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان، ۳ نمونه با استفاده از تجزیه کیفی و بررسی طیف‌های تهیه شده به روش SEM-EDS تجزیه شد. نتایج به دست آمده از این تجزیه‌ها، وجود ۲ نوع کانی عناصر خاکی کمیاب مونازیت و آلانیت را به همراه آپاتیت در این کانه‌زایی نشان می‌دهد. تصاویر EDS نشان می‌دهد که در بخش‌های مرکزی بلورهای آپاتیت، تمرکز به نسبت بالایی از مونازیت‌های ریزبلور پراکنده وجود دارد؛ در حالی که در بخش‌های حاشیه‌ای بلورهای آپاتیت، تمرکز مونازیت کمتر است (شکل ۱۲). در برابر آن، بلورهای مونازیت موجود در فضای میان آپاتیت‌ها یا درون شکستگی‌ها، ابعاد درشت‌تری دارند (شکل ۱۲). مونازیت‌ها بیشتر در فضای میان بلورهای آپاتیت متمرکز هستند. با توجه به تصاویر EDS (شکل ۱۲)، ادخال‌های کانی‌های عناصر خاکی کمیاب در بخش‌های تیره رنگ آپاتیت میزبان در مقایسه با بخش‌های روشن‌تر تمرکز بالاتری نشان می‌دهند.

طیف‌های EDS و نتایج به دست آمده از تجزیه نقطه‌ای در بلورهای آپاتیت (شکل ۱۳- الف و جدول ۳- الف)، بیانگر تمرکز F و تا حدودی Cl در شبکه آپاتیت است که فلونور آپاتیت بودن آنها را تأیید می‌کند. طیف‌های EDS و نتایج بدست آمده از تجزیه بیشتر ادخال‌های موجود در بلورهای آپاتیت یا بلورهای موجود در فضای شکستگی‌ها (شکل ۱۳- ب و جدول ۳- ب)، بیانگر ترکیب مونازیت برای این نقاط است.

۱۰- سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی میانبارهای سیال

مطالعه میانبارهای سیال در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان روی بلورهای آپاتیت این کانه‌زایی صورت گرفت. به‌طور کلی، بلورهای آپاتیت از دید وجود میانبارهای سیال اولیه و شبه ثانویه، فقیر هستند و در مجموع در ۳ نمونه مطالعه شده، ۱۵ میانبار سیال شناسایی و مطالعه شد. میانبارهای سیال اولیه به‌صورت مجزا و به نسبت درشت درون آپاتیت‌ها پراکنده هستند. میانبارهای سیال از نظر شکل بیشتر به‌صورت گرد، بی‌شکل و گاه کشیده و میله‌ای دیده شده‌اند و ابعاد طولی آنها میان ۵/۵ تا ۳۶ میکرون متغیر است. ویژگی‌های کلی میانبارهای سیال در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی از دید تشکیل‌دهنده‌ها، ۳ نوع میانبار سیال در نمونه‌های مطالعه شده به شرح زیر وجود دارد (شکل ۱۴). نوع A) دوفازی مایع- گاز غنی از فاز مایع (L+V)؛ این نوع میانبارهای سیال به فاز مایع همگن می‌شوند که در آنها، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم میانبار سیال را فاز مایع دربر می‌گیرد و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۳۵ درصد حجم میانبار را شامل می‌شود. بیشترین نوع میانبارهای سیال مطالعه شده در نمونه‌ها از این نوع هستند. نوع B) سه‌فازی شامل مایع و گاز به همراه CO₂ مایع که با تشکیل کلاتریت همراه هستند (V+LH₂O-LCO₂). حضور CO₂ محلول در فاز سیال سبب می‌شود که در طی فرایند ذوب یخ، کلاتریت تشکیل شود که در جدول داده‌ها، به‌صورت مقادیر مثبت برای Tm آورده شده است. نوع C) سه‌فازی گاز- مایع- جامد (V+L+S). این نوع میانبار سیال تنها در یک نمونه دیده شد که دمای همگن‌شدگی فاز جامد آن ۱۷۱ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به ریزبودن میانبار سیال، امکان تشخیص فاز جامد میسر نشد.

بر پایه محاسبات انجام شده از روی دمای Tm، شوری میانبارهای سیال مورد مطالعه از ۴/۹۵ تا ۳۰/۵۲ درصد وزنی NaCl متغیر است (جدول ۴). در نمونه‌های مطالعه شده، بیشترین فراوانی درصد شوری در محدوده ۷/۸۶ تا ۱۳/۹ درصد وزنی NaCl است (شکل ۱۵- الف). دامنه تغییرات دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای

عیار ۳۵/۷ درصد را برای P₂O₅ نشان داده است. در نمونه‌های مربوط به پهنه اکتینولیت- آپاتیت- مگنتیت (سنگ سبز)، محتوای Fe_۲ میان ۲/۴ تا ۲۸ درصد و عیار P₂O₅ میان ۲/۸۷ تا ۳۰/۶ درصد است. در این نمونه‌ها عیار SiO₂ به ۱۶ تا ۳۰/۶ درصد می‌رسد.

با توجه به مقدار فسفات موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان، به‌طور کلی می‌توان این کانه‌زایی را در قالب ۴ نوع کانسنگ شامل کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت، کانسنگ مگنتیت- آپاتیت، کانسنگ فسفاتی و پهنه اکتینولیت- آپاتیت- مگنتیت تقسیم‌بندی کرد. کانسنگ چیره در منطقه از نوع کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت است. ارزیابی همبستگی میان تمرکزهای SiO₂، P₂O₅، Fe_۲ و ΣREE بیانگر این است که Fe_۲ همبستگی منفی قوی با SiO₂، P₂O₅ و ΣREE به ترتیب برابر با (۰/۸۵-)، (۰/۶۱-) و (۰/۷۱-) درصد دارد. P₂O₅ دارای همبستگی مثبت قوی با ΣREE برابر با ۰/۷۴ درصد است. نمودارهای فراوانی Fe_۲ در برابر P₂O₅ و ΣREE در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که Fe_۲ همبستگی منفی با P₂O₅ و ΣREE دارد. همچنین، توزیع مقادیر P₂O₅ در برابر ΣREE نشانگر یک همبستگی مثبت مشخص میان آنهاست (شکل ۱۰).

منابع عمده‌ای از کانسارهای مگنتیت- آپاتیت در پهنه ایران مرکزی (بلوک پشت پادام) شناسایی شده‌اند که هر یک مورد بررسی پژوهشگران مختلف قرار گرفته و به تمرکز عناصر خاکی کمیاب در آنها اشاره شده است (درویش‌زاده، ۱۳۶۲؛ عابدیان، ۱۳۶۲؛ سامانی، ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸؛ مختاری و همکاران، ۱۳۸۲؛ Daliran, 1990; Förster and Jafarzadeh, 1994; Jami, 2005; Mokhtari and Emami, 2008; Mokhtari et al. 2013; Mokhtari and Ebrahimi, 2015; Mokhtari, 2016). بر پایه مطالعات یاد شده، یکی از ویژگی‌های کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت در ایران مرکزی، فراوانی عناصر خاکی کمیاب در آنهاست. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی در زمینه تمرکز عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی همیجان نشان از این دارد که عیار میانگین ΣREE در نمونه‌های برداشته شده از کانسنگ مگنتیت- آپاتیت برابر با ۵۴۴۵ ppm، در کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت برابر با ۲۳۶۳ ppm و در پهنه اکتینولیت- آپاتیت- مگنتیت برابر با ۶۷۲۳ ppm است. عیار ΣREE در نمونه برداشت شده از بلورهای آپاتیت بسیار قابل توجه است و به ۲۵۴۲۶ ppm (۲/۵ درصد) می‌رسد. بر این اساس می‌توان گفت که تمرکز عناصر خاکی کمیاب در این کانه‌زایی در ارتباط با بخش‌های فسفاتی (بلورهای آپاتیت) است.

الگوی تغییرات عناصر خاکی کمیاب بهنجار شده با کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های برداشت شده از انواع کانسنگ‌های مربوط به کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۱) نشانگر این است که نمونه‌های مربوط به همه کانسنگ‌ها شامل کانسنگ مگنتیت- آپاتیت، کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت، کانسنگ فسفاتی و کانسنگ اکتینولیت- آپاتیت- مگنتیت، روندهای کاملاً مشابه دارند. تفاوت آشکار این نمونه‌ها، در محتوای REE است که بیشترین مقدار REE برای کانسنگ فسفاتی و کم‌ترین مقدار را برای کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت است. این تشابه الگو در عناصر خاکی کمیاب، بیانگر منشأ مشترک انواع کانسنگ‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت منطقه همیجان است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، همه نمونه‌ها الگوی غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE و بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu را نشان می‌دهند. به باور (Frietsch and Perdahl 1995) تپه‌شدگی Eu در کانسارهای آهن نوع کایرونا در اثر اکسید شدن محیط (به دلیل وجود مگنتیت و هماتیت) و یا جانشینی Eu به جای Sr و Ca به دلیل تشابه شعاع یونی باشد.

به‌طور کلی، با توجه به شواهد مطالعات صحرایی و ژئوشیمیایی می‌توان کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان را در گروه کانسارهای آهن نوع کایرونا رده‌بندی کرد. در مورد منشأ کانسارهای نوع کایرونا نظرات مختلفی از کاملاً ماگمایی حاصل از عدم اختلاط (Phillipotts, 1976; Frietsch, 1978; Nyström and Henriquez, 1994;) تا برون‌دمی همزمان با رسوب‌گذاری (Parak, 1991) و گرمایی (Kolker, 1982; Naslund et al., 2002 Bookstrom, 1977; Hildebrand, 1986; Hitzman et al., 1992;) ارائه شده است.

Naslund et al. (2002) به پدیده جدا شدن مذاب اکسید آهن اختلاط‌ناپذیر از مذاب سیلیکاته در هنگام سرد شدن ماگما و همچنین ذوب بخشی یا کامل سنگ‌های پوسته‌ای غنی از آهن باور دارند که در هر دو مورد، انتقال آهن به‌صورت ماگمای غنی از آهن صورت می‌گیرد و تفاوت اصلی آنها در چگونگی شکل‌گیری ماگماست. (Hitzman et al. (1992) به تشکیل این کانسارها به‌صورت رگه‌ای گرمایی یا جانشینی و Parak (1991) به کانسارهای برون‌دمی-رسوبی باور دارند که در هر دو مورد، انتقال آهن به‌صورت ترکیبات محلول در سیال بوده و تفاوت اصلی آنها با یکدیگر در چگونگی و مکان‌نشینی آهن است. از خاستگاه‌های دیگری که توسط پژوهشگران مختلف برای کانسارهای نوع کایرونا ارائه شده است، می‌توان به منشأهای ماگمایی (Nyström and Henriquez, 1994)، متاسوماتیک (Hitzman et al., 1992) و گرمایی (Bookstrom, 1977) اشاره کرد.

منشأ ماگمایی مطرح شده بیشتر بر پایه ایزوتوپ‌های اکسیژن پایدار، بافت‌های ماگمایی مانند مگنتیت ستونی و دندرتی، میان‌بهارهای سیال در پیروکسن‌ها، بافت‌های آذرین و ارتباط میان توده معدنی و سنگ میزبان بوده است که بر این اساس، ذخایر آهن نوع کایرونا از یک مذاب اکسید آهنی دما بالای غنی از مواد فرار تشکیل شده‌اند (Förster and Jafarzadeh, 1994; Nyström and Henriquez, 1994;)؛ (Henriquez and Nyström, 1998; Harlov et al., 2002; Naslund et al., 2002; Henriquez et al., 2003; Nyström et al., 2008). شماری از مطالعات که با داده‌های شیمیایی مگنتیت و آپاتیت مرتبط هستند، این مدل را حمایت می‌کنند (Nyström and Henriquez, 1994; Frietsch and Perdahl, 1995;)؛ (Naslund et al., 2002). برخی مطالعات، یک مدل گرمایی را برای ذخایر نوع کایرونا بیان می‌کنند. بر پایه این مدل، جانشینی متاسوماتیک توسط سیال‌های گرمایی غنی از آهن با شوری بالا برای تشکیل توده معدنی مگنتیت-آپاتیت معرفی شده است (Hildebrand, 1986; Hitzman et al., 1992; Gleason et al., 2000)؛ (Sillitoe and Burrows, 2002; Jami et al., 2007). در عین حال (Barton and Johnson (1996) و Naslund et al. (2002) عنوان کردند که ذخایر مگنتیت-آپاتیت محصول سازوکار ماگمایی یا گرمایی منحصر به فرد نیستند؛ بلکه هر دو سازوکار ماگمایی و گرمایی در تشکیل این ذخایر سهیم هستند. (Nabatian and Ghaderi (2013) با مطالعه ایزوتوپ‌های اکسیژن در کانسار مگنتیت-آپاتیت سرخه‌دیزج (منطقه زنجان) که آن را از نوع کایرونا معرفی کرده‌اند، به این نتیجه رسیدند که مذاب ماگمایی در تشکیل این کانسار نقش نداشته است. ولی این مطالعات در همراهی با داده‌های میان‌بهارهای سیال بیانگر این است که سیال‌های کانه‌ساز برای تشکیل کانسنگ مگنتیت-آپاتیت، بیشتر از نوع ماگمایی هستند که در ادامه و در نتیجه اختلاط با سیال‌های جوی، منجر به نهشته شدن کانه‌زایی سولفیدی در مراحل تأخیری تشکیل کانه‌زایی سرخه‌دیزج شده است.

منشأهای مختلفی برای کانسارهای آهن ناحیه بافق پیشنهاد شده است. (Hitzman (2000) از منشأ ماگمایی و جایگزینی ماگمای غنی از مواد فرار و نهشته شدن مواد معدنی از سیال ماگمایی حمایت کرده و فرایند عدم امتزاج سیال را به عنوان منشأ این کانسارها در نظر گرفته است. (Förster and Jafarzadeh (1994) کانه‌زایی آهن منطقه بافق را مرتبط با تفکیک یک مذاب نامیزاک اکسید آهنی غنی از فسفر از یک مذاب ملانفلینیتی در یک محیط کافی می‌دانند. (Daliran (2002) فرایندهای گرمایی را عامل کانه‌زایی آهن و دگرسانی در ناحیه

سیال مورد مطالعه میان ۱۲۸ تا ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده (جدول ۴) و بیشترین فراوانی دمای همگن‌شدگی مربوط به محدوده دمایی ۲۴۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۴ و شکل ۱۵-ب). در نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی (شکل ۱۶)، یک پراکندگی خطی مشخص برای میان‌بهارهای سیال منطقه همیجان دیده می‌شود. بر پایه نمودار اشاره شده، در دامنه بسیار محدودی از شوری، دمای همگن‌شدگی بسیار متفاوت است و یک آرایش موازی با محور T_H و تا حدودی کاهش‌یافته دیده می‌شود. مطابق با نمودار (Wilkinson (2001)، روند یاد شده می‌تواند در ارتباط با سرد شدن و رقیق‌شدگی سیال‌ها باشد.

۱۱- نوع کانه‌زایی

هدف از مطالعات انجام شده روی ویژگی‌های مختلف یک کانه‌زایی شامل ساخت و بافت، کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی، شیمی کانه‌ها و مطالعه میان‌بهارهای سیال، شناسایی پدیده‌هایی است که به تشکیل و تمرکز عناصر معدنی در کانسار انجامیده است. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان و با توجه به تقسیم‌بندی (Dill (2010)، می‌توان این کانه‌زایی را در گروه کانسارهای آهن ماگمایی و زیرمجموعه کانسارهای آهن-آپاتیت-عناصر خاکی کمیاب در نظر گرفت. (Nyström and Henriquez (1994) با مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی مگنتیت‌های کانسارهای آهن ماگمایی در نواحی مختلف جهان، آنها را به دو گروه کانسارهای آهن چینه‌سان آتشفشانی-بروندمی و کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت و آپاتیت‌های رگه‌ای تقسیم کرده‌اند. بر پایه مطالعات همین پژوهشگران، از ویژگی‌های ژئوشیمیایی شاخص کانسارهای آهن ماگمایی (مگنتیت-آپاتیت و آپاتیت‌های رگه‌ای)، فقیرشدگی از عنصر Cr (در حد کمتر از ۱۰ ppm) و بالا بودن مقدار (۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰) است. محتوای عنصر Ti نیز در آنها پایین بوده (۱۰۰۰-۱۰۰ ppm) و گاه تا ۵۰۰۰ ppm متغیر است. میانگین عناصر Cr، V و Ti برای نمونه‌های مربوط به کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان به ترتیب برابر با ۳/۸۴ ppm، ۱۰۴۷ ppm و ۸۴۹ ppm است (جدول ۱). بر این اساس، می‌توان کانه‌زایی آهن همیجان را در گروه کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در نظر گرفت.

(Loberg and Horndahl (1983) بر پایه مقادیر Ni، V، Fe و Ti به رده‌بندی انواع کانسارهای آهن پرداخته‌اند. با استفاده از تغییرات V در برابر Ni می‌توان کانسارهای اکسید آهن-آپاتیتی و تیتانیم‌دار را از کانسارهای آهن رسوبی جدا کرد. همچنین، از تغییرات نسبت Ni/Ti و Ti/Fe در برابر نسبت V/Ti و V/Fe می‌توان کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت، کانسارهای آهن تیتانیم‌دار و کانسارهای آهن رسوبی (BIF) را از یکدیگر تشخیص داد. بر این اساس، کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان در محدوده کانسارهای اکسید آهن آپاتیت‌دار قرار می‌گیرد (شکل ۱۷).

مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان با دیگر کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام (مانند اسفوردی، لکه‌سیاه، زریگان، گزستان، چادرمولو، چغارت، سه‌چاهون و...) بیانگر همانندی کامل آنها با یکدیگر است (شکل ۱۸). از سوی دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر خاکی کمیاب کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام و منطقه همیجان با دیگر کانسارهای نوع کایرونا در دیگر نقاط جهان (شامل کایرونا، رکتون، هنری و ال‌لاکو؛ Frietsch and Perdahl, 1995)، شباهت میان آنها را نشان می‌دهد (شکل ۱۸). همه نمونه‌های مورد مطالعه یک الگوی غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE را همراه با بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu نشان می‌دهند که از ویژگی‌های آپاتیت‌های موجود در کانسارهای آهن نوع کایرونا است (Frietsch and Perdahl, 1995). به باور (Frietsch and Perdahl (1995)، مگنتیت در کانسارهای آهن نوع کایرونا دارای محتوای بالای REE (> ۱۰۰۰ ppm) است که نشانگر میزان بالای تفریق در این کانسارهاست. با توجه به جدول ۱، محتوای مجموع عناصر خاکی کمیاب در نمونه‌های مربوط به کانسنگ مگنتیتی بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت از کانه‌زایی همیجان، دست کم به ۸۲۷ ppm می‌رسد.

مذاب سیلیکاته بیانجامد. محتوای بالای فسفر سبب جابه‌جایی مذاب غیر قابل امتزاج می‌شود و در نتیجه آهن تا دماهای بسیار پایین تر از دمای تبلور مگنتیت و تا ژرفاهای کمتر به صورت محلول خواهد بود (Moore and Modaberi, 2003). نقش دیگر مؤلفه‌های فرار مانند CO_2 و F نیز در این فرایند بسیار مهم است (Weidner, 1982). حضور فلئور-آپاتیت و کانی‌های آب‌دار (ترمولیت-اکتینولیت) نیز بیانگر محتوای بالای F و H_2O در مذاب مربوطه هستند. در برخی کانسارهای آهن بلوک پشت بادام، بخش‌های فسفاتی، اکسیدی و سیلیکاته غیر قابل امتزاج درون دیگر بخش‌ها دیده می‌شود. برای نمونه، قطراتی از مگنتیت را می‌توان درون بلورهای آپاتیت و همچنین درون توده‌های گرانیتی دید. این موضوع بیانگر جدایش ناقص ماگما در سطوح پوسته‌ای است. مذاب سیلیکاته سبب تشکیل توده‌های نفوذی سینیتی، گرانیتی و گابرویی شده و مذاب اکسید آهنی-فسفاتی به سطوح بالاتر رفته و ذخایر مگنتیت-آپاتیت را به وجود آورده است. تمرکز بالای مواد فرار سبب دگرسانی، برشی شدن و متاسوماتیسم سنگ‌های میزبان شده است. تبلور مگنتیت به همراه مقادیر محدودی آپاتیت از مذاب یاد شده به افزایش فشار فاز سیال غنی از عناصر ناسازگار مانند P, REE, Th, U, F و Cl می‌انجامد. در پایان، این سیال‌ها به درون کانسنگ آهن و سنگ‌های میزبان وارد می‌شوند و رگه، رگچه‌ها و پهنه‌های فسفاتی را به وجود می‌آورند که بیشتر در حاشیه توده‌های مگنتیتی در برخی کانسارهای منطقه همچون کانسار مگنتیت-آپاتیت اسفوردی دیده می‌شوند. سیال‌های گرمایی تأخیری غنی از عناصر ناسازگار، در برخی کانه‌زایی‌های مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام سبب از بین رفتن شواهد مربوط به فاز عدم امتزاج مذاب سیلیکاته و اکسیدی-فسفاتی شده است. ولی خود این سیال‌ها سبب گسترش مراحل بعدی کانه‌زایی در این کانسارها (مانند کانسار مگنتیت-آپاتیت اسفوردی) شده‌اند. در مجموع می‌توان گفت، با توجه به ابعاد بسیار بزرگ برخی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام، حجم بزرگی از مذاب یا سیال‌های گرمایی دما بالا برای تشکیل این ذخایر مورد نیاز است. در مجموع به نظر نمی‌رسد که تنها مذاب غیر قابل امتزاج یا تنها سیال‌های گرمایی سبب تشکیل ذخایر مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام شده باشند. بنابراین می‌توان گفت که جدایش مذاب اکسید آهنی غنی از مواد ناسازگار (مانند P و REE) و فرایندهای گرمایی بعدی هر دو به درجات مختلفی در تشکیل کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام درگیر بوده‌اند. به منظور شناسایی دقیق سهم هر یک از فرایندهای یاد شده در تشکیل کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان، مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار می‌تواند مفید باشد.

سپاسگزاری

نگرانندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوه و همچنین از سردبیر و داوران محترم فصلنامه علوم زمین به‌خاطر راهنمایی‌های علمی ارزنده‌شان که موجب غنای بیشتر مقاله حاضر شد، سپاسگزاری می‌کنند.

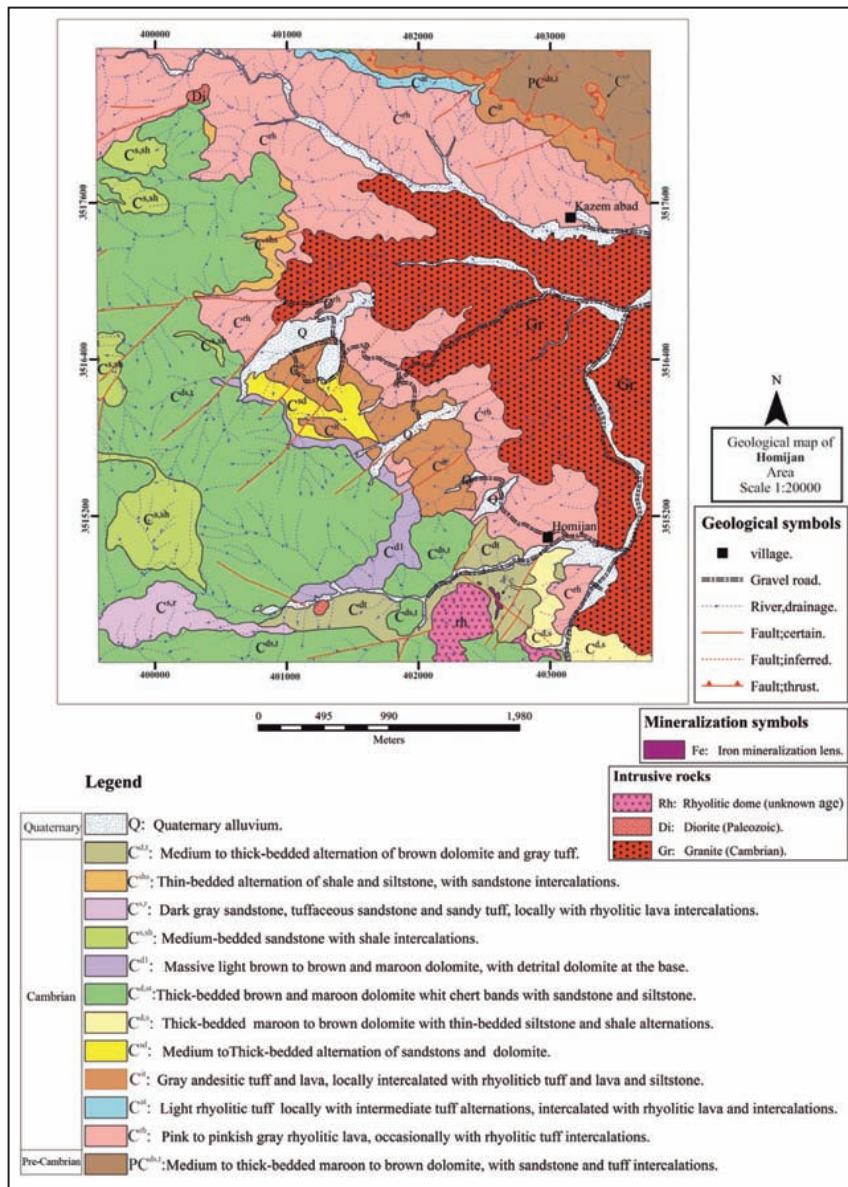
باقی می‌داند. (Moore and Modaberi, 2003) نقش هر دو فرایند مذاب نامیژاک اکسید آهنی و متاسوماتیسم قلیایی را مورد توجه قرار داده‌اند. (Jami, 2005) و (Mohamad Torab and Lehmann, 2008) منشأ این کانسارها را گرمایی و سیال‌های مربوطه را به‌طور چیره از سنگ‌های تبخیری کامبرین آغازی و در درجه دوم از ماگماهای گرانیتی دانسته‌اند. (Mokhtari et al., 2013) فرایند عدم امتزاج و در ادامه، فرایندهای گرمایی را در تشکیل کانسارهای آهن ناحیه بافق دخیل می‌دانند.

پژوهشگران مختلف باور دارند که کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام ارتباط ژنتیکی با ماگماهای آلکالن تا ساب‌آلکالن مجاور خود دارند (محمدی، ۱۳۹۳؛ بیات، ۱۳۹۳؛ Daliran, 1990؛ Williams and Houshmand Zadeh, 1966؛ Föster and Jafarzadeh, 1994؛ Moore and Modaberi, 2003؛ Jami, 2005؛ Daliran and Stosch, 2005؛ Mokhtari et al., 2013). ارتباطات صحرائی و شواهد زمین‌شناسی در کانسارهای آهن-آپاتیت بلوک پشت بادام گویای این است که توده‌های نفوذی و نیمه نفوذی گرانیتی (و همچنین ریولیتی)، سینیتی و گابرویی که بیشتر به عنوان میزبان کانسارهای یاد شده هستند و یا ارتباط صحرائی نزدیک با آنها دارند، محصول فعالیت ماگمایی درون صفحه‌ای هستند و در یک محیط کشتی تشکیل شده‌اند (نبوی شقاقی، ۱۳۹۳؛ محمدی، ۱۳۹۳؛ بیات، ۱۳۹۳). توده‌های یاد شده از دید زمانی، همزمان با تشکیل کانسارهای آهن منطقه هستند. عدسی‌های مگنتیت-آپاتیت منطقه همیجان نیز همراهی نزدیک با توده‌های گرانیتی، گابرویی و ریولیت نیمه‌نفوذی دارند و به نظر می‌رسد که همزمان با هم تشکیل شده‌اند. بر پایه مطالعات محمدی (۱۳۹۳)، توده گرانیتی همیجان، گرانیت فردوس، ریولیت کوه‌سیاه و نمونه‌های کانسنگ مگنتیت-آپاتیت در نمودارهای عنکبوتی دارای الگوی مشابهی هستند. تشابه الگوی تغییرات عناصر خاکی کمیاب در این گروه‌های سنگی می‌تواند بیانگر ارتباط ژنتیکی و منشأ احتمالی یکسان آنها باشد.

به‌طور کلی، مجموعه شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، ساخت و بافت و ویژگی‌های ژئوشیمیایی بیانگر نقش یک مذاب اکسید آهنی غنی از مواد فرار یا سیال ماگمایی غنی از آهن-فسفر-عناصر خاکی کمیاب برای تشکیل کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان است. به نظر می‌رسد که کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان، مشابه با بسیاری از کانسارهای مگنتیت-آپاتیت بلوک پشت بادام، نتیجه تفریق ماگمایی یک ماگمای آلکالن غنی از Fe و عناصر ناسازگار مانند P, REE, Th, U, F و Cl باشد که از ذوب بخشی گوشته بالایی حاصل شده است. منشأ گوشته‌ای توده‌های گرانیتی و گابرویی منطقه همیجان در مطالعات بلاغی و همکاران (۱۳۸۹)، محمدی (۱۳۹۳)، بیات (۱۳۹۳) و محمدی و همکاران (۱۳۹۴) عنوان شده است. گسل‌های ژرف سبب انتقال ماگمای اشاره شده به بخش‌های بالاتر و جایگیری آن در پوسته شده است. در این مخازن ماگمایی، محتوای بالای مواد آلکالن و فسفر می‌تواند به تشکیل مذاب غیر قابل امتزاج غنی از $\text{Fe-F-P-CO}_2\text{-H}_2\text{O-Na}$ و یک



شکل ۱- موقعیت گرانیت همیجان و کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان در جنوب باختر بهاباد روی تصویر ماهواره‌ای.



شکل ۲- نقشه زمین شناسی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه معدنی همیجان (مختاری و خضری، ۱۳۹۲). موقعیت منطقه مورد مطالعه و کانه‌ای مگنتیت-آپاتیت همیجان با کادر مشکی روی آن مشخص شده است.



شکل ۳- نمایی از موقعیت عدسی‌های شماره ۱ و ۲ در منطقه همیجان (دید به سوی جنوب باختر). عدسی شماره ۱ در دامنه گنبد ریولیتی کوه سیاه قرار دارد.



شکل ۴- دورنمایی از کوه‌سیاه با ترکیب ریولیتی (Rhy) و عدسی بزرگ کانی‌سازی آهن (عدسی شماره ۱) به رنگ تیره‌تر در دامنه آن (دید به سوی باختر و شمال باختر).



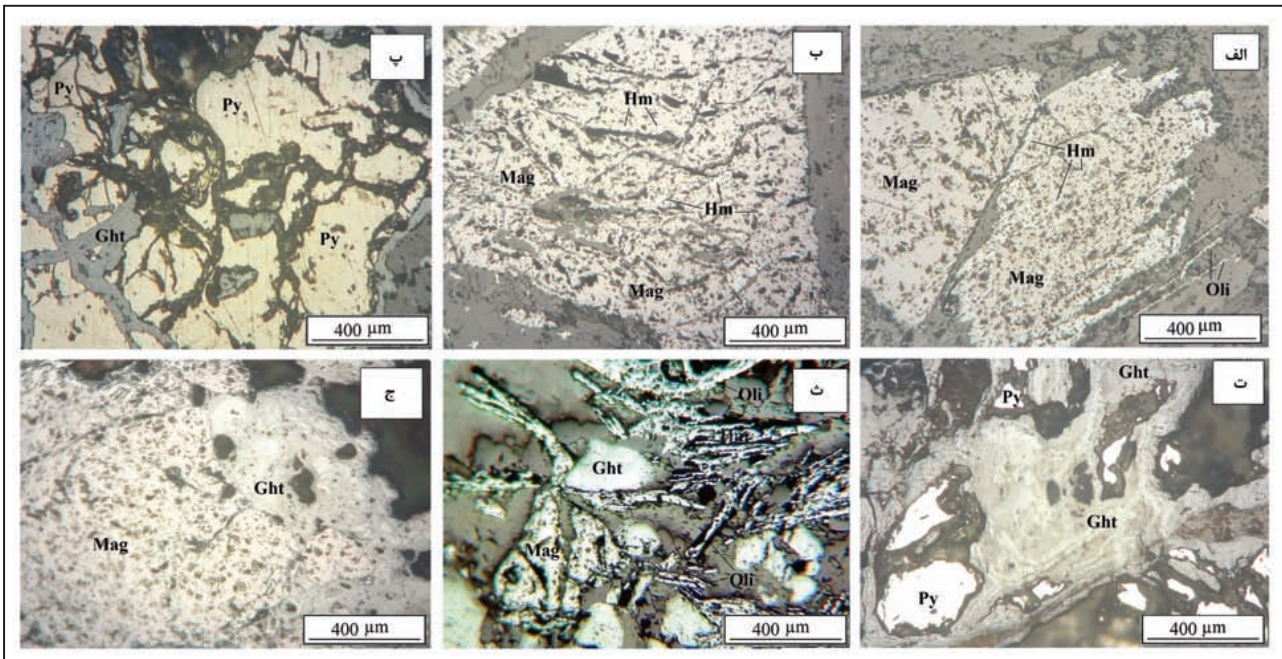
شکل ۵- نماهایی نزدیک از بلورهای خودشکل آپاتیت در متن کانسنگ مگنتیت در عدسی شماره ۲.



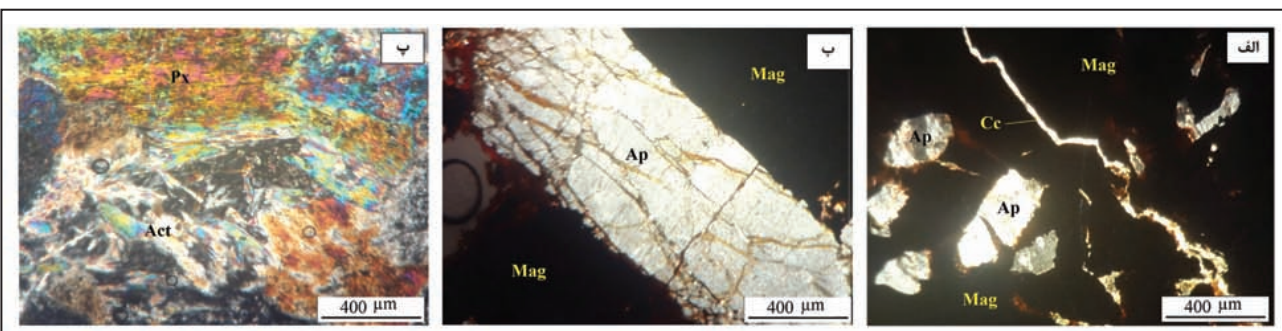
شکل ۶- الف) نماهی نزدیک از بلورهای رشته‌ای اکتینولیت (سنگ سبز) در حاشیه خاوری عدسی شماره ۲؛ ب) نماهی نزدیک از تشکیل ساخت برشی در کمر پایین عدسی شماره ۲ و درون دولومیت‌های میزبان.



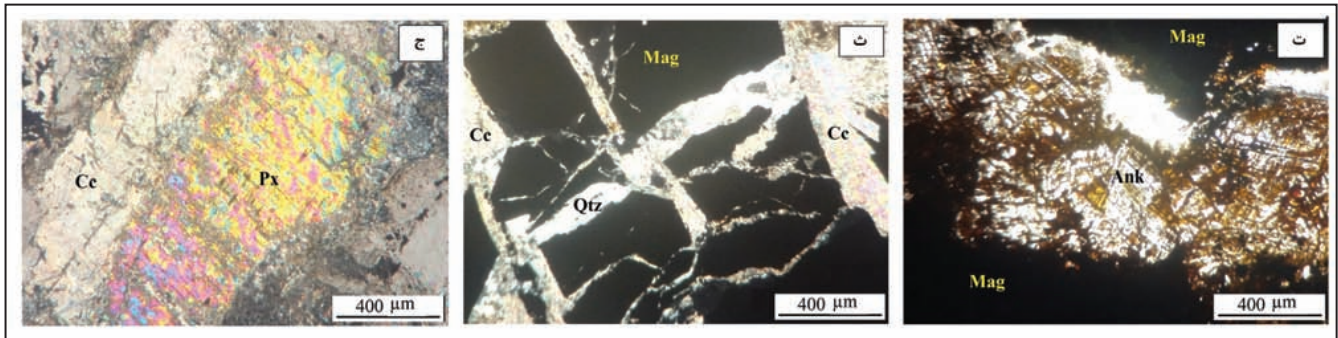
شکل ۷- الف) دورنمایی از موقعیت رخنمون عدسی مگنتیتی شماره ۳ منطقه همیجان در زیر ریولیت‌ها (Rhy) (دید به سوی باختر)؛ ب) نمایی نزدیک از عدسی شماره ۳ در محل تراشه حفر شده روی آن (دید به جنوب). در بالای تصویر و روی عدسی مگنتیت، ریولیت‌ها (Rhy) دیده می‌شوند.



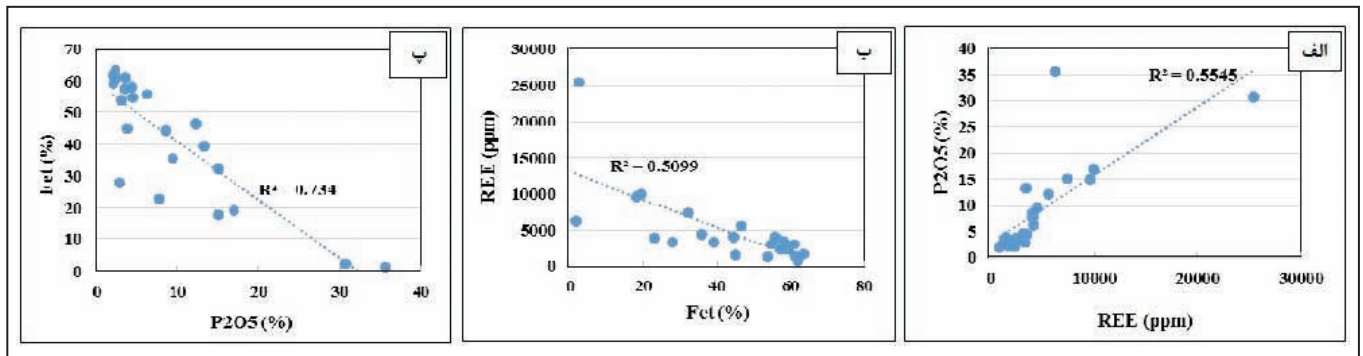
شکل ۸- الف) بلور مگنتیت مارتیتی شده و تیغه‌های اولیژیستی تأخیری؛ ب) بلور مگنتیت مارتیتی شده؛ پ) پیریت که در مسیر شکستگی‌های به گوتیت تبدیل شده است؛ ت) جزایر پیریت درون گوتیت‌ها و تشکیل بافت بازماندی؛ ث) بلورهای تیغه‌ای اولیژیستی تأخیری؛ ج) مگنتیت‌های دگرسان شده به گوتیت از حاشیه و مسیر شکستگی‌ها؛ همه تصاویر در نور بازتابی یک بار پلاریزه تهیه شده است. (Mag: مگنتیت، Hm: هماتیت، Ght: گوتیت، Oli: اولیژیست، Py: پیریت).



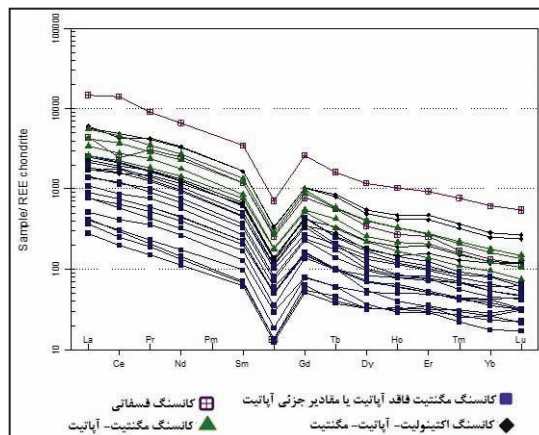
شکل ۹- الف) بلورهای شکل دار آباتیت درون مگنتیت و رگچه تأخیری قطع کننده مگنتیت؛ ب) بلور شکل دار شکسته شده آباتیت درون مگنتیت؛ پ) پیروکسن‌های اکتینولیتی شده در پهنه اکتینولیت-آباتیت-مگنتیت؛



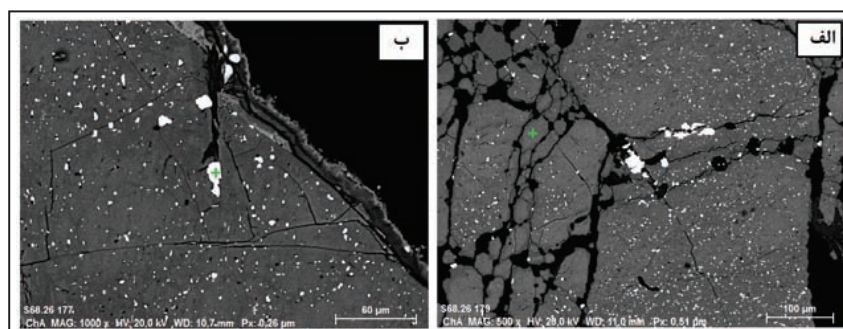
شکل ۹- (ت) رگچه آنکریتی قطع‌کننده مگنتیت؛ (ث) رگچه‌های کلسیتی و کوارتزی قطع‌کننده مگنتیت و برشی شدن مگنتیت؛ (ج) بقایای بلور پیروکسن درون کلسیت‌های حاصل از دگرسانی آنها. همه تصاویر در نور عبوری دو بار پلاریزه تهیه شده است (Mag: مگنتیت، Ce: کلسیت، Qtz: کوارتز، Px: پیروکسن، Ap: آپاتیت، Ank: آنکریت، Act: اکتینولیت).



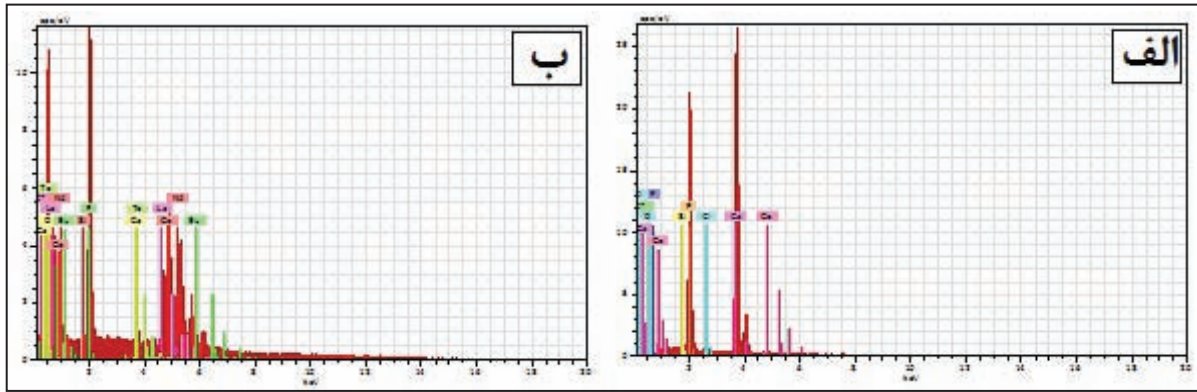
شکل ۱۰- الف) نمودار فراوانی \sum REE در برابر P_2O_5 ؛ ب) نمودار فراوانی Fe در برابر \sum REE؛ پ) نمودار فراوانی Fe در برابر P_2O_5 .



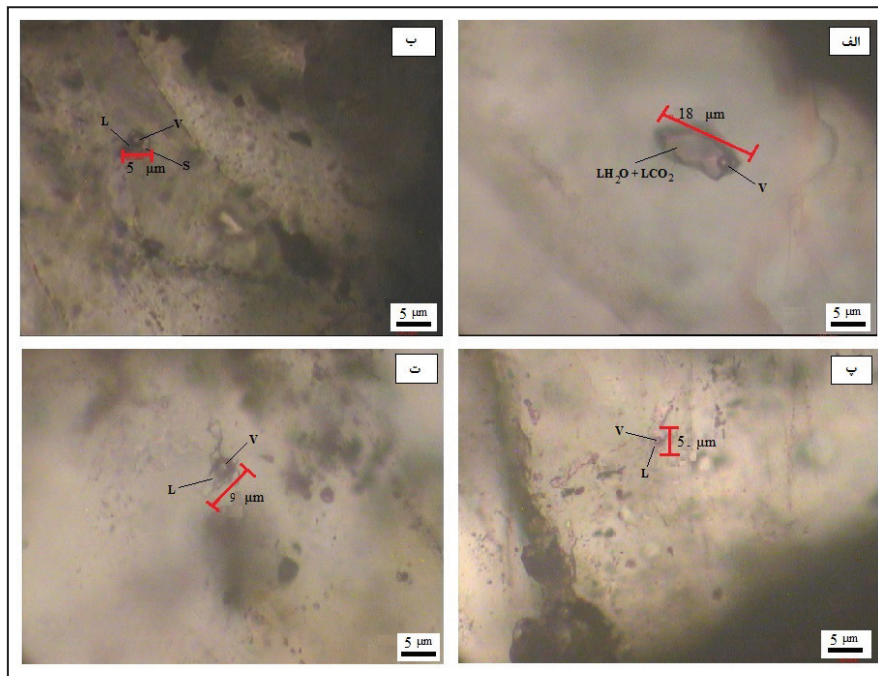
شکل ۱۱- الگوی عناصر خاکی کمیاب نمونه‌های مربوط به کانسنگ مگنتیت-آپاتیت، کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا دارای مقادیر جزئی آپاتیت، کانسنگ فسفاتی و کانسنگ اکتینولیت-آپاتیت-مگنتیت (مقادیر بهنجارسازی از (McDonough and Sun (1995)).



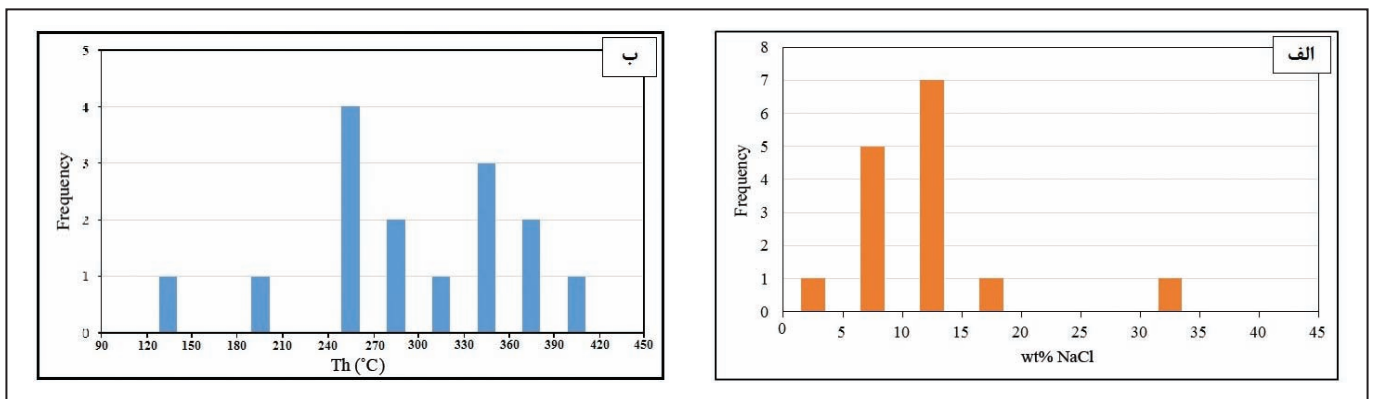
شکل ۱۲- ادخال‌های مربوط به کانی‌های عناصر کمیاب خاکی درون بلورهای آپاتیت در تصاویر EDS و نقطه تجزیه شده بلور آپاتیت؛ ب) ادخال درشت مونازیت موجود درون شکستگی‌های بلورهای آپاتیت که مورد تجزیه قرار گرفته است.



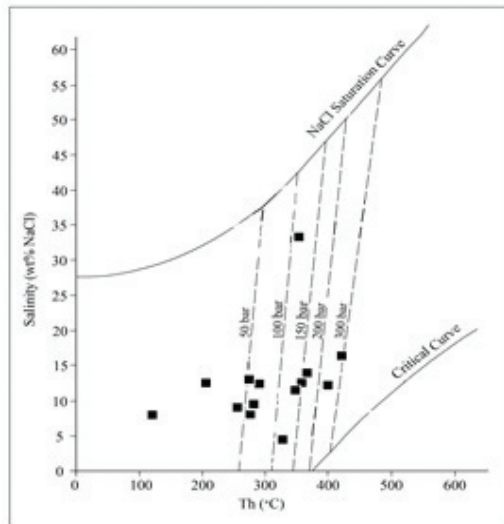
شکل ۱۳- طیف EDS مربوط به تجزیه بلورهای آپاتیت؛ (ب) طیف EDS مربوط به تجزیه ادخال‌های مونازیت درون بلورهای آپاتیت.



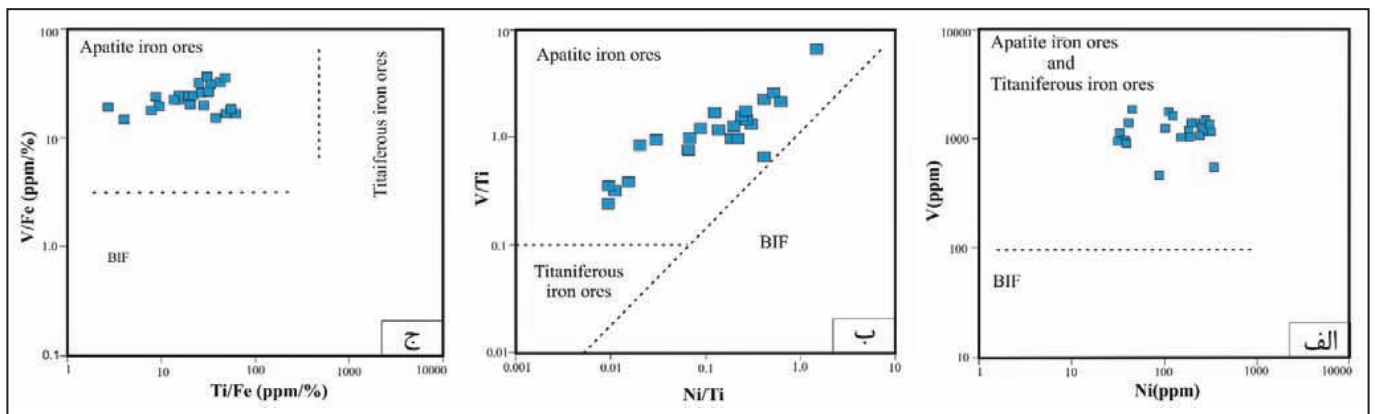
شکل ۱۴- تصاویری از میانبراهای سیال موجود در نمونه‌های مورد مطالعه: الف) سیال سه‌فازی V+LH₂O-LCO₂؛ ب) سیال سه‌فازی جامد-مایع‌گاز؛ پ و ت) سیال‌های دوفازی مایع-گاز.



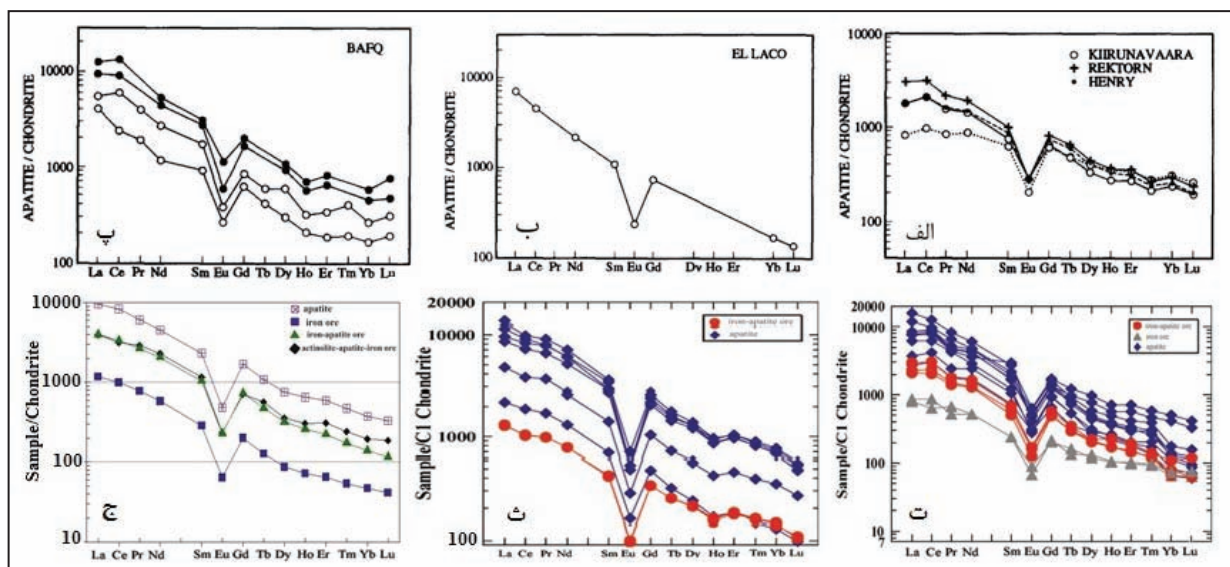
شکل ۱۵- الف) نمودار ستونی فراوانی‌های اندازه‌گیری شده در میانبراهای سیال دوفازی (L+V) که به فاز مایع همگن شده‌اند؛ ب) نمودار ستونی فراوانی محدوده دمایی همگن‌شدگی میانبراهای سیال دوفازی (L+V) که به فاز مایع همگن شده‌اند (L+V→L).



شکل ۱۶- نمودار شوری- دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای سیال منطقه مورد مطالعه. منحنی اشباع از NaCl و منحنی بحرانی از Ahmad and Rose (1980) و خطوط منقطع مربوط به فشار بخار (bar) محلول در درجات مختلف دما و شوری مختلف از Roedder (1984) است.



شکل ۱۷- موقعیت نمونه‌های مگنتیت- آپاتیت منطقه همیجان روی نمودارهای: الف) V در برابر Ni؛ ب) نسبت Ni/Ti در برابر نسبت V/Ti؛ ج) نسبت Ti/Fe در برابر V/Fe. نمودارها از Loberg and Horndahl (1983) برگرفته شده است.



شکل ۱۸- الگوی عناصر خاکی کمیاب در: الف) کانسارهای کایروناوآرا، رکتون و هنری، شمال سوئد (Frietsch and Perdahl, 1995)؛ ب) کانسار ال لاکو در شیلی (Frietsch and Perdahl, 1995)؛ پ) کانسارهای ناحیه بافق (Frietsch and Perdahl, 1995)؛ ت) کانسار اسفوردی ایران (Mokhtari et al., 2013)؛ ث) کانسار گزستان ایران (Mokhtari et al., 2013)؛ ج) کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت همیجان.

جدول ۱- نتایج تجزیه نمونه‌های برداشت شده از کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان (عناصر اصلی به درصد و عناصر کمیاب بر حسب ppm).

	Ha.82Ch	Ha.89Ch	Ha.94Ch	Ha.95Ch	Ha.100Ch	Ha.101Ch	Ha.111Ch	Ha.40Ch
	Fe ore	Fe-P ore	Fe-P ore	Fe-P ore	Fe ore	Fe-P ore	Fe ore	P ore
Fe ₁ (%)	61.09	44.98	32.21	35.61	53.7	44.39	59.38	1.43
P ₂ O ₅ (%)	2.55	3.84	15.02	9.4	3.13	8.47	2.14	35.69
SiO ₂ (%)	3.38	18.7	13.92	16.51	4.16	4.3	8.32	6.29
Ti	1740	1370	798	1590	2170	1420	471	29
Ni	116	120	156	103	46	42	192	12
Cr	1.2	1.2	10	5	2	1.2	1.2	13
V	1630	1620	1040	1250	1820	1370	1060	30
Y	113	114	586	275	114	265	139	327
La	281	282	1320	812	240	769	426	1370
Ce	612	611	3010	1830	522	1710	991	1991
Pr	72.2	73.1	354	223	63.5	202	111	378
Nd	266	270	1390	859	238	749	407	1490
Sm	43.5	44	235	149	39.9	120	64	234
Eu	3.65	3.79	19.5	13	3.73	10.3	5.41	18.8
Gd	41.5	42.6	229	134	38.7	114	59.8	203
Tb	4.67	4.82	26.8	15.4	4.71	12.2	6.61	26.7
Dy	22.4	23.1	128	71.3	22.4	58.4	31	110
Ho	4.33	4.24	23.7	12	4.62	10.3	5.62	19.4
Er	10.7	10.8	57.2	29.3	11.2	26.1	15.1	53.4
Tm	1.35	1.37	6.73	3.53	1.43	3.04	2.18	5.58
Lu	1.02	1.03	4.33	2.41	1.02	2.13	1.51	3.75
Yb	8.01	8.65	33.9	20	7.29	17.1	11.1	27.5
ΣREE	1485.33	1494.5	7424.16	4448.94	1312.5	4068.57	2276.33	6258.13

	Ha.144Ch	Ha.142Ch	Ha.143Ch	Ha.145Ch	Ha.147Ch	Ha.148Ch	Ha.149Ch
	Act-Ap- Mt ore	Fe ore	Fe ore	Fe ore	Fe-P ore	Fe ore	Act-Ap- Mt ore
Fe ₁ (%)	2.39	60.89	58.21	55.67	39.19	54.73	27.87
P ₂ O ₅ (%)	30.67	3.55	4.42	6.25	13.34	4.5	2.87
SiO ₂ (%)	18.5	4.51	3.52	4.56	7.8	10.8	33.41
Ti	75	1000	1020	1160	1130	493	824
Ni	27	267	305	197	247	252	344
Cr	5	3	1.2	1.2	3	1.2	5
V	54	1450	1340	1350	1080	1260	549
Y	1950	197	214	214	553	133	243
La	4590	581	674	806	1720	533	536
Ce	11500	1300	1460	1760	3710	1430	1270
Pr	1110	152	171	206	429	157	179
Nd	3970	555	630	759	1640	575	697
Sm	679	88.7	99.3	119	262	89.3	126
Eu	52.4	8.21	8.51	9.61	21.4	7.48	9.66
Gd	679	86.7	95	113	252	70.4	90.2
Tb	76.5	9.07	9.91	11.8	27.8	9.87	13.6
Dy	378	43.1	47.7	53.6	131	36.7	56.8
Ho	74.2	8.16	8.61	9.07	23.5	6.08	10.7
Er	169	20.4	21.3	23	58.1	16	32.8
Tm	25	2.52	2.79	2.76	7.14	1.83	4.18
Lu	17.6	1.74	1.94	1.94	4.8	1.37	3.87
Yb	129	13.7	16.6	16.7	37.3	9.55	24.8
REE	25426.7	3067.3	3460.66	4105.48	3377.04	3079.58	3297.61

ادامه جدول ۱

	Ha.150Ch	Ha.151Ch	Ha.153Ch	Ha.023Ch	Ha.026Ch	Ha.027Ch	Ha.028Ch
	Fe ore	Fe ore	Act-Ap- Mt ore	Fe ore	Fe-P ore	Act-Ap- Mt ore	Act-Ap- Mt ore
(%) Fe _t	57.44	61.99	22.78	63.4	46.57	17.91	19.27
(%) P ₂ O ₅	3.63	2.01	7.67	2.3	12.26	15	16.9
(%) SiO ₂	6.51	5.05	26	3.35	5.25	20.82	16.34
Ti	532	864	454	176	725	314	326
Ni	320	223	90	275	184	27	23
Cr	3	3	5	2	5	6	6
V	1150	1400	462	1190	1120	375	434
Y	152	52.9	323	65.7	369	680	750
La	446	160	707	338	1070	1900	1780
Ce	945	336	1560	698	2240	3470	3930
Pr	125	43.8	210	94.5	292	523	506
Nd	459	159	789	343	1060	2020	1980
Sm	71.9	25.3	132	52.3	166	323	324
Eu	6.06	2.17	10.1	4.43	13.3	24.2	24.8
Gd	62	20.6	107	39.2	143	267	268
Tb	8.26	2.87	16.1	4.75	20.1	37.8	40
Dy	32.8	11.7	71.8	17.6	83.2	158	176
Ho	5.99	2.09	13.6	2.86	15.6	29.7	33.6
Er	17.7	6.06	40.9	7.22	43.2	86.4	99.5
Tm	2.28	0.71	4.93	0.82	5.1	10.5	11.8
Lu	1.5	0.55	3.84	0.69	3.39	7.71	8.68
Yb	11.2	3.68	26	5.46	25.7	52	60
ΣREE	2346.69	827.43	4015.27	1674.53	5549.59	9589.31	9992.38

جدول ۲- توالی پاراژنری و فراوانی نسبی کانی‌های معدنی و باطله در کانه‌زایی آهن همیجان.

Mineralogy		Stages	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Supergene
Ore	Magnetite		██████████			
	Hematite (Oligist)				██████████	██████████
	Pyrite			██████████		
	Chalcopyrite			██████████		
	Goethite					██████████
	Limonite					██████████
Gangue	Apatite		██████████			
	Clinopyroxene		██████████			
	Tremolite-Actinolite			██████████		
	Calcite				██████████	
	Quartz			██████████	██████████	

جدول ۳- الف) نتایج تجزیه مربوط به نقطه‌ای درون بلور آپاتیت

Spektrum: M7a 2										
El	OZ	Serie	unn.	C norm.	C Atom.	C Verbindung	Comp.	C norm.	Comp.	C Fehler
(1 Sigma)				[Gew. %]	[Gew. %]	[At. %]		[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]
C	6	K-Serie		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
O	8	K-Serie		27.13	38.60	58.15		0.00	0.00	4.06
F	9	K-Serie		2.28	3.24	4.11		3.24	2.28	0.58
Si	14	K-Serie		0.14	0.20	0.17	SiO ₂	0.43	0.30	0.04
P	15	K-Serie		12.17	17.31	13.47	P ₂ O ₅	39.66	27.88	0.50
Cl	17	K-Serie		0.05	0.06	0.04		0.06	0.05	0.03
Ca	20	K-Serie		27.95	39.77	23.92	CaO	55.65	39.11	0.85
Ce	58	L-Serie		0.57	0.82	0.14	Ce ₂ O ₃	0.96	0.67	0.06
Sum:				70.29	100.00	100.00				

جدول ۳- ب) نتایج تجزیه مربوط به ادخال موناژیت درون بلورهای آپاتیت.

Spektrum: 29 6										
El	OZ	Serie	unn.	C norm.	C Atom.	C Verbindung	Comp.	C norm.	Comp.	C Fehler
(1 Sigma)				[Gew. %]	[Gew. %]	[At. %]		[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]
C	6	K-Serie		0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
O	8	K-Serie		16.77	27.15	66.18		0.00	0.00	2.25
Si	14	K-Serie		0.09	0.15	0.20	SiO ₂	0.31	0.19	0.03
P	15	K-Serie		8.18	13.24	16.67	P ₂ O ₅	30.33	18.73	0.35
Ca	20	K-Serie		0.47	0.76	0.74	CaO	1.06	0.65	0.05
Te	52	L-Serie		0.26	0.42	0.13		0.42	0.26	0.04
La	57	L-Serie		9.17	14.85	4.17	La ₂ O ₃	17.41	10.75	0.29
Ce	58	L-Serie		19.04	30.83	8.58	Ce ₂ O ₃	36.11	22.30	0.56
Nd	60	L-Serie		4.18	6.78	1.83	Nd ₂ O ₃	7.90	4.88	0.16
Eu	63	L-Serie		3.60	5.83	1.50	EuO	6.45	3.98	0.15
Sum:				61.75	100.00	100.00				

جدول ۴- اطلاعات ریزداسنجی میانبرهای سیال در آپاتیت‌های کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان (دما بر حسب °C).

S.N.	Phases	Size (µm)	Degree of filling	T _m	T _{h(S)}	T _{h(V)}	T _h	NaCl (wt.%)	Density (gr/cm ³)	Comments
M7a	V+L	8*3.5	0.92	-5	*	128	128	7.86	0.99	
M7a	V+L	36*16	0.94	3.6	*	257	257	*	0.98	clathrates
M7a	V+L	14*4	0.9	-5	*	267	267	7.86	0.84	
M7a	V+L	18*11	0.8	-9.5	*	205	205	13.4	0.78	
M7a	V+L	16*8	0.93	-5.5	*	245	245	8.54	0.96	
M7a	V+L	15*25	0.87	-8.5	*	285	285	12.28	0.87	
M7a	V+L	7*20	0.85	-6	*	273	273	9.2	0.85	
29O	V+L	18*9	0.8	-12.3	*	414	414	16.2	0.73	

ادامه جدول ۴- اطلاعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در آپاتیت‌های کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت همیجان (دما بر حسب °C).

S.N.	Phases	Size (μm)	Degree of filling	T _m	T _{h(s)}	T _{h(v)}	T _h	NaCl (wt.%)	Density (gr/cm ³)	Comments
290	V+L	5.5*6	0.85	-10	*	369	369	13.9	0.76	
290	V+L	7*3	0.9	-9.6	*	269	269	13.5	0.98	
290	V+L	10*6	0.75	-3	*	325	325	4.95	0.71	
290	V+L	4*15	0.82	-8.5	*	358	358	12.28	0.85	
390	V+L	5*12	0.87	-7.8	*	342	342	11.46	0.87	
390	V+L	3*10	0.75	-8	*	388	388	11.69	0.92	
390	V+L+S	10*6	0.55	-21	171	338	338	30.52	1.08	

کتابنگاری

- آقاباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ ص.
- بلاغی، ز. صادقیان، م. و قاسمی، ح.، ۱۳۸۹- پتروژنز سنگ‌های آذرین پالئوزویک زیرین جنوب بهاباد (باقی، ایران مرکزی)، پترولوژی، سال اول، شماره ۴، صص. ۴۵ تا ۶۴.
- بومری، م.، ۱۳۹۱- بررسی کانی‌های خاکی کمیاب در کانسار مگنتیت-آپاتیت اسفوردی، ناحیه بافق، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۵، صص. ۷۱ تا ۸۲.
- بیات، ا.، ۱۳۹۳- ژئوشیمی توده‌های گابرویی-دیوریتی جنوب‌باختر بهاباد (استان یزد) و بررسی نقش احتمالی آنها در کانی‌سازی آهن-آپاتیت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- درویش‌زاده، ع. و آل‌طه، ب.، ۱۳۷۵- ماگماتیسیم و تکتونوماگماتیسیم پرکامبرین پسین در ایران مرکزی، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۱، جلد ۲۲، صص. ۵۷-۷۸.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۶۲- بررسی فسفات بافق (اسفوردی)، مجله علوم دانشکده علوم دانشگاه تهران، شماره ۱۳، جلد ۱، صص. ۲ تا ۲۴.
- رحمانی، ش. و مختاری، م.ع.ا.، ۱۳۸۱- اکتشاف عناصر کمیاب فلزی و کانی‌های قیمتی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۶۸ ص.
- رحیمی، ا.، ۱۳۹۴- بررسی ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی در کانسار آهن-آپاتیت لکه سیاه، شمال خاور بافق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۱ ص.
- سامانی، ب.، ۱۳۶۴- کشف ماگماتیسیم کربناتی و پدیده‌های همراه آن در ایران و ارتباط آنها با کانسارهای منطقه بافق-ساغند، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۴، صص. ۹۹ تا ۱۰۷.
- سامانی، ب.، ۱۳۷۱- معرفی سازند ساغند با رخساره ریفتی و جایگاه چینه‌نگاری آن در پرکامبرین پسین ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶، صص. ۳۲ تا ۴۵.
- سامانی، ب.، ۱۳۷۷- متالوژنی پرکامبرین در ایران مرکزی (بخش اول)، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۱۷، صص. ۱ تا ۱۶.
- سامانی، ب.، ۱۳۷۸- فلززایی پرکامبرین در ایران مرکزی (بخش دوم)، نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۲۰، صص. ۱۵ تا ۳۱.
- سهیلی، م. و مهدوی، م.، ۱۳۷۰- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- صادقی دعوتی، و. و حسن‌زاده، ج. و علیرضایی، س.، ۱۳۸۶- کانه‌زایی‌های اکسید آهن-آپاتیت ناحیه بافق: رابطه مکانی، زمانی و ژئوشیمیایی با ماگماتیسیم گرانیتیویدی و حوضه‌های رسوبی کامبرین آغازی، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- عابدیان، ن.، ۱۳۶۲- اکتشاف مقدماتی رخنمون‌های آپاتیت در منطقه بافق-پشت بادام؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۴۲ ص.
- گل‌کرم، ش.، رشیدنژاد عمران، ن.، مسعودی، ف. و وهاب‌زاده، ق.، ۱۳۸۹- گرانت زریگان، ماگمای یا متاسوماتیک؟ دوفصلنامه نشریه علوم (دانشگاه خوارزمی)، دوره ۱۰، شماره ۲، صص. ۸۲۵ تا ۸۴۰.
- محمدتراب، ف.، ۱۳۸۹- بررسی‌های ژئوشیمی و رادیوایزوتوپی برای تعیین خاستگاه آپاتیت در ذخایر آهن-آپاتیت منطقه معدنی بافق. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال ۱۸، شماره ۳، صص. ۴۰۹ تا ۴۱۸.
- محمدی، ف.، ۱۳۹۳- ژئوشیمی توده گرانیتیویدی عظیم آباد (جنوب باختر بهاباد) و بررسی نقش احتمالی آن در کانی‌سازی آهن-آپاتیت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- محمدی، ف.، ابراهیمی، م. و مختاری، م.ع.ا.، ۱۳۹۴- پترولوژی و ژئوشیمی توده گرانیتیویدی همیجان و سنگ‌های اسیدی همراه (جنوب باختر بهاباد، ایران مرکزی). فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۸، صص. ۲۲۳ تا ۲۳۶.
- مختاری، م.ع.ا. و خضری، م.، ۱۳۹۲- گزارش اکتشاف عمومی کانسار آهن-آپاتیت همیجان، شرکت آریا جنوب ایرانیان، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان یزد.
- مختاری، م.ع.ا.، امامی، م.ه. و رحمانی، ش.، ۱۳۸۲- کانی‌زایی عناصر نادر خاکی در منطقه بافق-پشت بادام، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- موسوی ماکویی، ع.، ۱۳۷۷- بررسی پترولوژی گرانتیت نارینگان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- نیوی شقاقی، س.ط.، ۱۳۹۳- ژئوشیمی توده سینیتی شمال معدن اسفوردی (استان یزد) و بررسی نقش احتمالی آن در کانی‌سازی آهن-آپاتیت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.

References

- Ahmad, S. N. and Rose, A. W., 1980- Fluid inclusions in porphyry and skarn ore at Santa Rita, New Mexico. *Economic Geology* 75: 229-250.
- Barton, M. D. and Johnson, D. A., 1996- An evaporitic-source model for igneous related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology* 24: 259-262.
- Bonyadi, Z., Davidson, G. J., Mehrabi, B., Meffre, S. and Ghazban., F., 2011- Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se Chahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology* 281: 253-269.
- Bookstrom, A. A., 1977- The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology* 72: 1101-1130.
- Daliran, F. and Stosch, H. G., 2005- Geology and metallogenesis of the phosphate and rare earth element resources of the Bafq iron ore district, Central Iran. 20th World Mining Congress, 7- 11 November Tehran, Iran.
- Daliran, F., 1990- The magnetite- apatite deposit of Mishdovan, east central Iran. An alkali rhyolite hosted «Kiruna- type» occurrence in the infra-Cambrian Bafq metallotect; Ph.D. thesis, Univ. of Heidelberg, Geowiss. Abhandl. 37, 248 pp.
- Daliran, F., 2002- Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites. In Porter, T.M., (eds.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Volume 2: Adelaide, PGC Publishing, 303-320.
- Dill, H. G., 2010- The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews* 100: 1-420.
- Förster, H. J. and Jafarzadeh, A., 1994- The chador Malu iron ore deposit, Bafq district, central Iran, magnetite filled pipes; Neues. Jahrb. Palaont. Abh. 168: 524-534.
- Frietsch, R., 1978- On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type. *Economic Geology* 73: 478-485
- Frietsch, R. and Perdahl, J. A., 1995- Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna- type iron ores and some other iron ore type. *Ore Geology Review* 9: 489-510
- Gleason, J. D., Marikos, M. A., Barton, M. D. and Johnson, D. A., 2000- Neodymium isotopic study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 1059-1068.
- Haghipour, A., 1974- Etude géologique de la région de Biabanak- Bafq (Iran Central). Pour obtenir le grade de Docteur es sciences naturelles.
- Harlov, D. E., Andersson, U. B., Förster, H. J., Nyström, J. O., Dulski, P. and Broman, C., 2002- Apatite monazite relations in the Kirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden. *Chemical Geology* 191: 47-72.
- Henríquez, F. and Nyström, J. O., 1998- Magnetite bombs at El Laco volcano, Chile. *Garuda Frequent Flyer* 120: 269-271.
- Henriquez, F., Naslund, H. R., Nyström, J. O., Vivallo, W., Aguirre, R., Dobbs, F. M. and Lledó, H., 2003- New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile: A discussion. *Economic Geology* 98: 1497-1502.
- Hildebrand, R. S., 1986- Kiruna-type deposits: their origin and relationship to inter mediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada. *Economic Geology* 81: 640-659.
- Hitzman, M. W., 2000- Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why. In: Porter, T.M., (eds.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Adelaide, Australian Mineral Foundation 9-25.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N. and Einaudi, M. T., 1992- Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Research* 58: 241-287.
- Jami, M., 2005- Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate- iron deposit, Bafq area, central Iran; Unpublished Ph.D. thesis, University of South Wales, 403 pp.
- Jami, M., Dunlop, A. C. and Cohen, D. R., 2007- Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite- magnetite deposit, Central Iran. *Economic Geology* 102: 1111-1128.
- Kolker, A., 1982- Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis. *Economic Geology* 77: 1146-1158.
- Kryvdik, S. and Mykhaylov, V., 2001- The potential of the rare earth mineralization of Islamic republic Iran; National academy of science of Ukraine, 48 pp.
- Loberg, B. E. H. and Horndahl. A. K., 1983- Ferride geochemistry of Swedish Precambrian iron ores, *Mineralium deposita* 18: 487-504.
- McDonough, W. F. and Sun, S. S., 1995- Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- Mohamad Torab F. and Lehmann B., 2008- Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. *Mineralogical Magazine* 71: 347-363.
- Mokhtari, M. A. A. and Ebrahimi, M., 2015- Geology and Geochemistry of Homeijan Magnetite- Apatite Deposit (SW Behabad, Yazd province). *Geochemistry Journal* 2 (2): 20-27.
- Mokhtari, M. A. A. and Emami, M. H., 2008- REE pattern and REE mineralization in apatite-magnetite deposits of Bafq-Saghand district (Central Iran). *Geosciences, Scientific Quarterly Journal, Special Issue* 17: 162-169.
- Mokhtari, M. A. A., 2016- Posht-e-Badam Metallogenic Block (Central Iran): A suitable zone for REE mineralization. *Central European Geology* 58(3): 199-216.
- Mokhtari, M. A. A., Emami, M. H. and Hosseinzadeh, Gh., 2013- Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. *Journal of Earth System Sciences* 122: 795- 803.

- Moore, F. and Modaberi, S., 2003- Origin of the Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: New isotopic and geochemical evidences. *Journal of Sciences, University of Tehran* 14(3): 259- 268.
- Nabatian, Gh. and Ghaderi, M., 2013- Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkhe- Dizaj iron oxide-apatite deposit, NW Iran. *International Geology Review* 55(4): 397-410.
- Naslund, H. R., Henriquez, F., Nyström, J. O., Vivallo, W. and Dobbs, F. M., 2002- Magmatic iron ores and associated mineralization: Examples from the Chilean high Andes and coastal cordillera. In: Porter, T.M., (eds.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, V. 2, Adelaide, PGC Publishing 207–226.
- Nyström, J. O. and Henriquez, F., 1994- Magmatic features of iron ores of the Kiruna-type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry, *Economic Geology* 89: 820-839.
- Nyström, J. O., Billstrom, K., Henriquez, F., Fallick, A. E. and Naslund, H. R., 2008- Oxygen isotope composition of magnetite in iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden. *Garuda Frequent Flyer* 130: 177–188.
- Parak, T., 1991- Volcanic sedimentary rock-related metallogenesis in the Kiruna-Skellefte belt of northern Sweden. *Economic Geology* 8: 20–50.
- Phillipotts, A. R., 1976- Silicate liquid immiscibility: Its probable extent and petrogenetic significance. *Am. J. Sci.*, 276: 1147-1177.
- Ramazani J. and Tucker R. D., 2003- The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics; *American J. Sci.* 303: 622-665.
- Roedder, E., 1984- Fluid inclusions, *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, 12: 644 pp.
- Sillitoe, R. H. and Burrows, D. R., 2002- New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, Northern Chile. *Economic Geology* 97: 1101–1109.
- Weidner, R. J., 1982- Iron oxide magmas in the system F-C-O. *Canadian Mineralogist* 20: 555-666.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55: 229- 272.
- Williams, G. J. and Houshmand Zadeh, A., 1966- A petrological and genetic study of the Choghart iron ore body and the surrounding rocks. *Geological Survey of Iran*, 18p.

Mineralogy, geochemistry, fluid inclusion study and genesis of Homeijan magnetite- apatite mineralization, SW Behabad, Yazd province

R. Amirkhani ¹, M. Ebrahimi ^{2*}, M. A. A. Mokhtari ² and A. M. Azimzadeh ²

¹M.Sc. Student, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²Assistant Professor, Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 2016 March 02

Accepted: 2016 July 31

Abstract

The study area which is introduced as Homeijan magnetite- apatite mineralization in this paper, is a part of the Posht-e-Badam block in the Central Iranian Zone and is located at ~12Km southwest of Behabad. This area is composed of volcano-sedimentary rocks and acidic- basic intrusions of Precambrian and Cambrian age. Magnetite- apatite mineralizations are present as lenses near the southwestern part of the Homeijan village, which are hosted by acidic- intermediate tuffaceous rocks and dolomites. Magnetite, oligist (hematite), pyrite and chalcopyrite are the main ore minerals and apatite, pyroxene, tremolite- actinolite, calcite and quartz are as gangue minerals in the Homeijan Fe mineralization. Based on field and mineralogical studies, this mineralization texturally includes massive, brecciated, vein-veinlets and replacement textures. Chemical analyses of samples indicate that the mineralization has high concentrations of REEs up to 2.5 % in the apatite crystals. Geochemical studies demonstrate that Fe_t have high negative correlation with P_2O_5 , SiO_2 and $\sum REE$ while there is a high positive correlation between $\sum REE$ and P_2O_5 . SEM-EDS qualitative analyses of apatite crystals indicate two REE bearing minerals including monazite and allanite as inclusions within the apatites. Furthermore, this study demonstrates that the apatite crystals are flour- apatite. Fluid inclusion studies within the apatite crystals indicate that main salinity varies between 7.86-13.9 wt.% NaCl and homogenization temperature is between 240-370°C. Comparing of REE patterns of Homeijan magnetite- apatite mineralization with other iron oxide- apatite mineralizations of Posht-e-Badam Block and Kiruna- type iron ores indicate similarities between these patterns. Generally, based on field and geochemical studies, the Homeijan magnetite- apatite mineralization classified as Kiruna- type Fe deposit.

Keywords: Magnetite- Apatite mineralization, Homeijan, Behabad, Posht-e-Badam Block, Central Iran

For Persian Version see pages 83 to 100

*Corresponding author: M. Ebrahimi; E-mail: ebrahimi@znu.ac.ir